



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Kasper Käyhkö

Maanvastaisen betonilaatan päällystysratkaisujen vesihöyryn läpäisevyyden analysointi

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.11.2017

Valvoja: Professori Xiaoshu Lu-Tervola

Ohjaaja: Tekniikan tohtori Juhani Pirinen

Tekijä Kasper Käyhkö		
Työn nimi Maanvastaisen betonilaatan päällysratkaisujen vesihöyryn läpäisevyyden analysointi		
Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka		
Pääaine Rakennusmateriaalit ja rakennusfysiikka		Koodi IA3017
Työn valvoja Prof. Xiaoshu Lu-Tervola		
Työn ohjaaja TkT Juhani Pirinen		
Päivämäärä 27.11.2017	Sivumäärä 89 + 9	Kieli Suomi

TIIVISTELMÄ

Kosteudesta johtuvat päällystevauriot ovat aiheuttaneet ongelmia rakennusalalla viime vuosikymmenien aikana. Useat nykyaikaiset lattiapäällysteet ovat erittäin vesihöyrytiivitä ja alttiita kosteusongelmille. Ongelma korostuu erityisesti vanhoilla lämmöneristämättömillä alapohjarakenteilla, jos rakenteen alapuolisen maakerroksen lämpötila nousee aiheuttaen kondensoitumisriskiä kosteuden siirtyessä maasta rakenteeseen. Lattiarakenteen kohonnut kosteuspitoisuus voi aiheuttaa pintamateriaalien vaurioitumista, homehtumisriskiä ja sitä kautta vakavia terveyshaittoja tilojen käyttäjille. Päällystevaurioiden syyt ovat monimutkaisia ja vaativat rakenteen yhdistetyn lämmön ja kosteuden siirtymisen tarkasteluja. Tämän työn tarkoituksena on tutkia vanhan maanvastaisen alapohjarakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa kenttämittausten sekä tietomallin avulla, kun rakenne päällystetään eri lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet omaavilla lattiapäällysteillä.

Tutkimuksessa luotiin kaksidimensioinen tietomalli simuloimaan rakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa tiheillä ja läpäisevillä päällysteillä. Tutkimustuloksia vesihöyrypitoisuudesta betonirakenteen ja päällysteen rajapinnalla kerättiin 3 – 5 kuukauden ajan, yhteensä 23 eri päällysteeltä. Tietomallin toimintaa validoitiin vertaamalla simulatiosta saatuja tuloksia kenttämittauksista saatuihin tuloksiin. Mittaustulosten ja mallin välillä havaittiin selkeä yhtäläisyys.

Tulosten perusteella voitiin havaita selkeitä eroja vesihöyrypitoisuuksissa tiiviiden ja läpäisevien päällysteiden välillä. Tärkeimpänä uutena tutkimustuloksena huomattiin savi- lattian, tekstiilimaton ja erikoisvinyylipohjaisen tekstiilimaton korkea vesihöyryn läpäisevyys. Vastoin alkuoletuksia, vesiohenteisella hiertoepoksinnoitteella huomattiin olevan matala vesihöyryn läpäisevyys.

Tutkimustulosten perusteella hyvin kosteutta läpäiseviä päällysteitä tulee suosia lämmöneristämättömiä alapohjarakenteita päällystettäessä. Tulosten perusteella heikosti kosteutta läpäiseviä päällysteitä ei suositella vastaavanlaisissa rakenteissa käytettäväksi. Kohtalaisesti kosteutta läpäiseviä päällysteitä käytettäessä rakenteen toiminta tulee olla erityisen tarkkaan analysoitu ja mallinnettu etukäteen. Kenttämittauksia jatketaan, jotta voidaan havaita eroja kosteuspitoisuuksissa myös läpäisyominaisuuksiltaan toisiaan lähempänä olevien päällysteiden välillä. Lisäksi päällysteiden alapuolisesta korkeasta kosteuspitoisuudesta johtuen, jatkotutkimustarpeena nähdään päällysteiden sekundäriemissioiden mittaaminen noin 1 – 2 vuoden päästä päällysteiden asentamisesta.

Avainsanat matemaattinen malli, simulaatio, kenttämittaus, lattiapäällyste

Author Kasper Käyhkö		
Title of thesis Analysis of water vapor permeability of different floorings on ground-bearing concrete slab		
Degree programme Structural Engineering and Building Technology		
Major Building Materials and Building Physics		Code IA3017
Thesis supervisor Prof. Xiaoshu Lu-Tervola		
Thesis advisor D.Sc. (Tech.) Juhani Pirinen		
Date 27.11.2017	Number of pages 89 + 9	Language Finnish

ABSTRACT

Flooring and coating failures due to moisture have challenged the construction industry for decades. Many modern floorings have very low moisture permeability and are susceptible to moisture problems. The problem is particularly emphasized in the old floor structures, without thermal insulation, which have potential condensation risk if the soil temperature increases, causing moisture to transfer into the structure under temperature gradient. Floor structure with elevated moisture level can damage the surface materials, promote mold growth and pose serious health risks. It is well-acknowledged that causes of the flooring failure are complicated and include coupled heat and moisture transfer between soil and structures. The purpose of this thesis was to conduct extensive field measurements and modeling to investigate the thermal and moisture behaviors of old ground-bearing concrete slabs coated with different floorings.

A two-dimensional hygrothermal model was developed to simulate heat and moisture performance of the structures with dense and permeable floorings. Measurements of vapor contents between the concrete surface and the floorings were collected during 3 – 5 months for 23 different floorings. The simulation model was validated by comparing simulated results with measurements. Good agreement was obtained.

The results showed a clear difference in water vapor content under dense and permeable floorings. The most important new finding was the high permeability of the clay floor, the textile mat and the textile mat with special vinyl layer. Unlike the initial assumptions, the water-soluble epoxy resin had a low permeability.

As conclusions, permeable floorings are preferred over low-permeable ones when coating ground-bearing structures, without thermal insulation. When choosing semi-permeable floorings, the hygrothermal performances of the structures should be well evaluated and modeled in advance. The future work includes continuous long-term field measurements in order to detect the differences of vapor contents under the floorings with close vapor penetration properties. Due to the high water vapor content under the floorings, measurements of secondary emissions from the floorings are also desired. Further investigations should be carried out 1 – 2 years after coating.

Keywords mathematical model, simulation, field measurement, flooring

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoulun Rakennustekniikan laitokselle FCG Rakennusterveys ja sisäilmastopalveluiden toimeksiannosta. Työn ohjaajana toimi FCG:n Juhani Pirinen ja valvojana toimi Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Xiaoshu Lu-Tervola.

Työn aiheeseen päädyttiin lukuisien, mediassakin pinnalla olleiden, ns. muovimatto-ongelmien johdosta. Työssä haluttiin selvittää erilaisten lattiapäällysteiden soveltumista olosuhteisiin, joissa lattiarakenteen kosteuspitoisuus on korkea. Työ on osa pidempään jatkuvaa tutkimusta, jossa myöhemmässä vaihteessa pyritään vertailemaan eri päällysteiden sekundaariemissioita kosteusrasituksen alaisina.

Kiitän FCG Rakennusterveys ja sisäilmastopalveluiden osastoa ja erityisesti ohjaajaani Juhani Piristä ideasta mielenkiintoiseen tutkimusaiheeseen sekä työn rahoituksen järjestämisestä. Kiitän myös Jouko Immosta Lahden Tilakeskukselta, joka järjesti sopivan tilan kenttämittausten suorittamiselle sekä FCG:n Harri Nymania, josta oli suuri apu kenttätutkimuksissa ja mittausjärjestelyissä. Aalto-yliopiston puolelta kiitän työn valvojana toiminutta Xiaoshu Lu-Tervolaa. Lisäksi haluan kiittää kaikkia materiaalivalmistajia/-toimittajia, jotka osoittivat suurta mielenkiitoa tätä työtä kohtaan. Erityiskiitos kaikille läheisille, ystäville sekä työkavereille, jotka jaksoivat kuunnella kiukuttelua ja voivottelua työhön liittyneen stressin takia.

Espoossa 27.11.2017

Kasper Käyhkö

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	I
Abstract	II
Alkusanat	III
Sisällysluettelo	IV
Käsitteet ja merkinnät	VI
1 JOHDANTO	1
2 RAKENNUSFYSIKKA	3
2.1 Energian säilyminen ja termodynamiikka	3
2.1.1 Johtuminen	4
2.1.2 Säteily	6
2.1.3 Konvektio	8
2.1.4 Yhdistetty lämmönsiirtyminen	10
2.2 Lämmön varastoituminen materiaaliin	10
2.3 Kosteuden siirtyminen huokoisessa aineessa	11
2.3.1 Kapillaari-ilmiö	12
2.3.2 Diffuusio	14
2.3.3 Yhdistetty kapillaarinen siirtyminen ja diffuusio	16
2.3.4 Kosteuskonvektio	17
2.4 Kosteuden sitoutuminen materiaaliin	18
3 MAANVASTAINEN BETONIALAPOHJA	22
3.1 Alapohjan lämpöolosuhteet	22
3.2 Alapohjan kosteusolosuhteet	23
3.3 Alapohjan lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen	27
3.4 Kosteuden aiheuttamat ongelmat betonisessa alapohjarakenteessa	29
3.5 Alapohjan kosteusvaurioiden ennaltaehkäisy	33
4 ALAPOHJAMATERIAALIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSTEKNISET OMINAISUUDET	36
4.1 Betoni	36
4.2 Täyttömaa	43
4.3 Lattiapäällysteet	43
4.4 Mattoliimat	51
4.5 Lattiatasoite	51
4.6 Pohjusteet	52
5 TUTKIMUKSET JA SIMULAATIO	53
5.1 Tutkimuksen kulku	53
5.2 Kenttätutkimukset	54
5.2.1 Mittauskenttien valmistelut	54
5.2.2 Tutkittu rakenne	55
5.2.3 Rakenteen alkuarvot	56
5.2.4 Tutkitut päällysteet	58
5.2.5 Käytetyt mittausmenetelmät	63
5.3 Simulaatio	63
5.3.1 Alku- ja raja-arvot	63
5.3.2 Materiaaliominaisuudet	66
5.3.3 Laskentaverkko	66
5.3.4 Laskenta-aika	67
6 TULOKSET	68

6.1.1	Huoneen A päällysteet	69
6.1.2	Huoneen B päällysteet	76
6.2	Tulosten luotettavuuden analysointi	78
7	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	79
	Lähteet	81

Liite 1. Valokuvat tutkituista päällysteistä. 4 sivua.

Liite 2. COMSOL Multiphysics –ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet. 3 sivua.

Liite 3. Päällysteiden alta mitatut vesihöyrypitoisuudet tutkimuksen aikana. 2 sivua.

KÄSITTEET JA MERKINNÄT

Absoluuttinen kosteus, a

Ilman sisältämän vesihöyryn määrä tilavuuden suhteen. $[g/m^3]$

Absorptio

Atomien, molekyylien tai ionien sitoutuminen aineeseen.

Adsorptio

Atomien, molekyylien tai ionien sitoutuminen aineen pinnoille.

Anisotrooppinen

Tarkoitetaan tässä työssä materiaalia, jonka ominaisuudet ovat erilaiset, riippuen suunnasta, jossa niitä tarkastellaan.

Desorptio

Absorption vastakohta, eli atomien, molekyylien tai ionien vapautuminen aineesta.

Diffuusio

Yksittäisen kaasun osapaine-erosta johtuva kaasumolekyylien liike, jonka suunta on korkeammasta osapaineesta matalampaan.

Emissio

Energian tai hiukkasten siirtyminen materiaalista ympäristöön.

Fluidi

Tässä työssä fluideilla tarkoitetaan sekä nesteitä (vettä) että kaasua (vesihöyry).

Heterogeeninen

Epäyhtenäinen materiaali, josta on erotettavissa eri aineosat.

Homogeeninen

Yhtenäinen tai tasa-aineinen materiaali.

Hulevesi

Sade- ja sulamisvedet rakennetulla alueella.

Hydrataatio

Reaktio, jonka seurauksena veden ja sementin muodostama massa kovettuu kuivuessaan.

Hygroσκοoppisuus

Huokoisen aineen kyky sitoa kosteutta itseensä ja vapauttaa sitä takaisin ilmaan.

Isotrooppinen

Tarkoitetaan tässä työssä materiaalia, jolla on samat ominaisuudet tarkastelusuunnasta riippumatta.

Kapillaarisuus

Huokoisen materiaalin kyky siirtää vettä kapillaariputkiin verrattavissa olevan huokosverkoston välityksellä. Veden kapillaarivirtaus aiheutuu huokosten sisällä vaikuttavista kapillaarivoimista.

Kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti, $D_{w,s}$

Ilmoittaa huokoisen materiaalin läpi kapillaarisesti siirtyvän kosteusvirran tiheyden ja materiaalin pintojen välisen kosteuspitoisuuseron suhteen kosteusvirran suunnassa. [m^2/s]

Kokonaiskosteusdiffusiviteetti, D_w

Ilmoittaa kosteusmäärän, joka läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön kokoisen ja pituusyksikön paksuisen materiaalin, kosteuspitoisuuseron ollessa materiaalin pintojen välillä yksikön suuruinen. [m^2/s]

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, h

Lämpömäärä joka siirtyy aikayksikössä pinta-alayksikön suuruiselta pinnalta ympäristöön, ympäristön ja pinnan lämpötilaeron ollessa yksikön suuruinen. [W/m^2K]

Kosteusongelma

Kosteusvaurion aiheuttama ongelma esim. homeongelma päällysteessä.

Kosteusvaurio

Liian korkeasta tai pitkään jatkuneesta kosteuspitoisuudesta aiheutuva vaurio, jonka syy tulee selvittää ja vaurioituneet rakenteet korjata.

Kosteuspitoisuus, u

Haihtumiskykyisen veden massan suhde kuiva-aineen massa. [$p\%$]

Kosteussisältö, W

Haihtumiskykyisen veden massan suhde betonin tilavuuteen. [kg/m^3]

Lattiapinnoite

Lattiapinnoitteella tarkoitetaan tässä työssä telalla tai lastalla levitettäviä lattiapinnoitteita kuten epoksi- tai polyuretaanimassoja.

Lattiapäällyste

Lattiapäällysteellä tarkoitetaan tässä työssä yleisnimitystä kaikille tutkimuksessa käsiteltäville päällysteille sekä pinnoitteille.

Lämmönjohtavuus, λ

Lämpömäärä, joka läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen materiaalin, kun materiaalin eri puolien välinen lämpötilaero on yksikön suuruinen. [W/mK]

Lämmönvastus, R

Ilmoittaa materiaalin tai rakenteen eri puolilla olevien pintojen lämpötilaeron materiaalin läpi menevän lämpövirrantiheyden suhteen. [m^2K/W]

Mikrobi

Tässä tutkimuksessa homeet, hiivat tai bakteerit.

Solidi

Kiinteä aine.

Stationääritila

Vakiotila, jossa systeemiin tietyllä aikavälillä saapuvien ja sieltä poistuvien massa- tai energiamäärien summa on nolla.

Suhteellinen diffuusiovastus, S_d

Ilmoittaa seisovan ilmakerroksen paksuuden, jonka vesihöyrynvastus on yhtä suuri kuin tarkasteltavan materiaalin vesihöyrynvastus. [m]

Suhteellinen kosteus, RH

Ilmoittaa, kuinka paljon ilmassa on kosteutta suhteessa maksimikosteuspitoisuuteen, jonka tietyssä lämpötilassa oleva ilma pystyy sitomaan itseensä. [%]

Vesihöyryn osapaine, p

Ilmoittaa ilman seassa olevan vesihöyryn paineen.

Vesihöyrynläpäisevyys, δ

Ilmoittaa vesihöyryn määrän, joka läpäisee aikayksikössä pinta-alayksikön suuruisen ja pituusyksikön paksuisen materiaalin, kun vesihöyryn osapaine-ero materiaalin eri puolilla on yksikön suuruinen. [m^2/s]

Vesi-sementtisuhte, v/s

Betonin sisältämän vesimäärän massa suhteessa sementin massaan.

1 JOHDANTO

Tutkimuksen tausta

Kosteusvauriot ja rakennusten sisäilmaongelmat ovat olleet pinnalla mediassa viime aikoina. Yksi yleisimmistä kosteusvauriorakenteista on maata vasten oleva alapohjarakenne. Selvitysten mukaan (mm. Kurnitski et al. 1996 ja Meklin et al. 2008) koulujen kosteusvauriot liittyvät yleisimmin alapohjarakenteisiin. Myös pientalojen kosteusvauriot löytyvät yleensä alapohjarakenteista (Pirinen 2006). Betonin rakennekosteuden riittämättömän kuivumisen sekä vesivahinkojen (putkivuotojen tms.) lisäksi, yksi syy alapohjarakenteiden kosteusvaurioille on riittämätön rakennusfysiikan sekä päällysteiden ominaisuuksien tunteminen. Päällystevalintoja tehtäessä tulee ymmärtää erityisesti alapohjarakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymisen perusteet sekä tuntea päällysteen rakennusfysikaaliset ominaisuudet kuten vesihöyryn läpäisevyys.

Olemassa olevat tutkimukset

Maanvastaisen alapohjarakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymistä sekä lattiapäällysteiden vesihöyryn läpäisevyyttä ja sen vaikutusta rakenteen kuivumiseen ovat tutkineet Suomessa ainakin Ralf Lindberg, Virpi Leivo, Jukka Rantala, Jussi Eronen, Leif Wirtanen, Vesa Räsänen, Vesa Penttala sekä Tarja Merikallio. Päällysteiden vesihöyryn läpäisevyyteen liittyvät tutkimukset ovat kuitenkin pääasiassa toteutettu laboratorio-olosuhteissa ja niiden pääpainona on ollut betonin rakennekosteuden kuivuminen. Lisäksi tutkimuksissa käytettyjen päällysteiden materiaalikirjo on ollut suppea.

Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen päätavoitteena on analysoida vanhan maanvastaisen lämmöneristämättömän betonialapohjarakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymistä, kun rakenne päällystetään eri lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet omaavilla päällysteillä. Tarkoituksena on havainnoida, kuinka nopeasti rakenteen kosteuskäyttäytymisessä voidaan huomata eroja ns. tiiviiden ja vesihöyryä läpäisevien päällysteiden välillä. Lisäksi tutkimuksen tavoitteena on luoda 2D-tietomalli, jonka toiminta korreloi kenttämittauksista saatujen tulosten kanssa. Mallista ja kenttämittauksista saatujen tulosten perusteella on tarkoitus tehdä lista päällysteistä, joita voidaan jatkossa suositella käytettävän vastaavanlaisia rakenteita päällystettäessä.

Tutkimuksen rajaus

Tutkimuksessa perehdytään maanvastaisen lämmöneristämättömän betonialapohjarakenteen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen eri päällysteratkaisuilla. Tutkimuksessa tarkasteltavaksi rakenteeksi valittiin vanha kellarin maanvastainen alapohjalaatta, jota voidaan pitää lämpö- ja kosteusteknisesti päällysteiden kannalta tavallista haastavampana rakenteena. Tutkimuksessa tarkastellaan lattiapäällysteitä, joita tällä hetkellä käytetään Suomessa. Tutkimuksen ulkopuolelle on rajattu päällysteet, jotka ovat poistuneet markkinoilta. Varsinaista rajausta päällysteiden käyttökohteen mukaan ei kuitenkaan ole tehty, eli tutkimuksessa tarkastellaan sekä teollisuustilojen ja julkisten tilojen että asuinrakennusten päällysteitä.

Tutkimuksessa ei perehdytä sen tarkemmin kenttämittauksissa käytettyihin mittausmenetelmiin, vaan työssä keskitytään materiaalien lämpö- ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin sekä saatujen tulosten vertailuun ja analysointiin.

Tutkimuksen sisältö

- Luvussa kaksi perehdytään tämän työn kannalta merkittävimpiin rakennusfysikaalisiin ilmiöihin: lämmön ja kosteuden sitoutumiseen ja siirtymiseen rakenteessa tai materiaalissa.
- Luvussa kolme tutustutaan maanvastaisen betonialapohjan kannalta merkittävimpiin lämpö- ja kosteusolosuhteisiin sekä niihin vaikuttaviin tekijöihin. Lisäksi luvussa käydään läpi yleisimpiä kosteuden aiheuttamia ongelmia maanvastaisissa betonialapohjarakenteissa.
- Luvussa neljä tutustutaan tarkemmin maanvastaisen betonialapohjan eri rakennekerrokseen ja niiden lämpö- ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin. Luvussa perehdytään erityisesti betonin sekä erilaisten markkinoilla olevien pintamateriaalien lämpö- ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin.
- Luvussa viisi käydään läpi tässä tutkimuksessa toteutetut kenttämittaukset sekä simulaatio. Luvussa tutustutaan tutkimuksen kulkuun ja lähtökohtiin sekä tutkittaviin rakenteisiin ja päällysteisiin.
- Luvussa kuusi käydään läpi kenttämittauksista ja tietomallista saadut tulokset sekä vertaillaan niitä keskenään.
- Luvussa seitsemän tehdään yhteenveto ja johtopäätökset saaduista tutkimustuloksista ja pohditaan mahdollisia jatkotutkimustarpeita.

2 RAKENNUSFYSIKKA

Tässä luvussa rakennusfysikaalisista ilmiöistä tarkastellaan ainoastaan lämmön ja kosteuden siirtymistä materiaaleissa tai niiden pinnoilla. Lisäksi tarkastellaan lämmön ja kosteuden varastoitumista materiaaleihin.

2.1 Energian säilyminen ja termodynamiikka

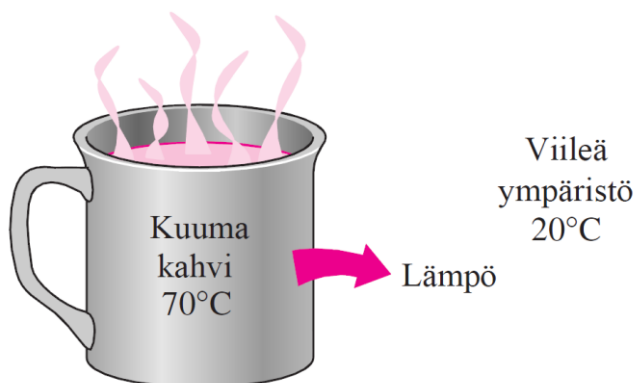
Materiaalien lämpötarkastelun pohjana toimii energian säilymislaki. Energian säilymislain mukaan kappaleeseen makroskooppisella tasolla kohdistuvan liike-energian (K), potentiaalienergian (U) ja kappaleen sisäisen energian (E_{int}) summan tulee olla sama, kuin mekaanisen työn (W) ja ulkoisen lämmön (Q) kappaleeseen kohdistavan energian määrä: (yksinkertaistettuna lähteestä Serway ja Jewett 2010, s. 202)

$$\Delta Q + \Delta U + \Delta E_{\text{int}} = W + Q \quad (1)$$

Rakennusfysiikassa tapahtumaa, jossa energiaa siirtyy kappaleen tai tilan läpi, tai kappaletta pitkin kutsutaan lämmön siirtymiseksi. Lämmön siirtymisen pohjana toimivat termodynamiikan lait. Termodynamiikan nollannen pääsäännön mukaan eristetyssä systeemissä eri lämpötilassa alkutilanteessa olevat kappaleet asettuvat lopulta samaan lämpötilaan. (Serway ja Jewett 2010, s. 545) Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö on energian säilymislaista rakennusfysiikan sovelluksiin johdettu erikoistapaus, jossa vain kappaleen sisäinen energia muuttuu ja kappaleeseen kohdistuu energiaa ainoastaan ulkoisen lämmön seurauksena: (sovellettuna lähteestä Serway ja Jewett 2010, s. 578)

$$\Delta E_{\text{int}} = Q \quad (2)$$

Termodynamiikan toisen lain mukaan lämpöä siirtyy aina lämpimämmästä partikkelista kylmempään (Kuva 1). (Çengel ja Ghajar 2015, s. 2)



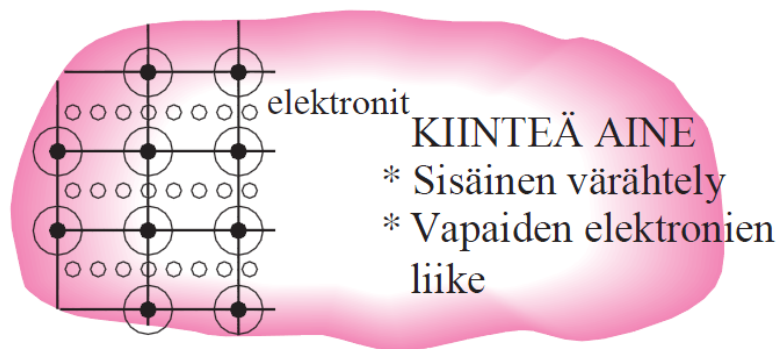
Kuva 1 Termodynamiikan toisen lain mukaan lämpöä siirtyy aina lämpimämmästä kylmempään (Alkuperäinen lähde Çengel ja Ghajar 2015, s. 2).

Rakennusfysiikassa ollaan kiinnostuneita, ei pelkästään siitä, kuinka paljon lämpöä siirtyy rakenteeseen tai sen läpi, vaan myös siitä, kuinka kauan siirtyminen kestää. Tätä ongelmaa ei pystytä ratkaisemaan pelkästään termodynamiikan tarkasteluilla, vaan tätä varten tulee

perehtyä tarkemmin lämmön siirtymiseen ja eri siirtymistapoihin. (Çengel ja Ghajar 2015, s. 2) Lämmön siirtymisen periaatteena toimii lämpötilaero kappaleiden välillä. Lämpöä siirtyy kolmella eri tavalla: johtumalla, säteilemällä tai konvektiolla. Lämpöä voi siirtyä samanaikaisesti myös kaikilla kolmella eri tapaa. (Hagentoft 2001, s. 4, 53)

2.1.1 Johtuminen

Kiinteissä aineissa kuten betoni, lämpöä siirtyy pääasiassa johtumalla. Johtumisessa lämpöä siirtyy molekyyliltä toiselle, molekyilien sisäisen värähtelyn avulla sekä vapaiden elektronien välityksellä (Kuva 2). (Hagentoft 2001, s. 4; Çengel ja Ghajar 2015, s. 18) Johtumisessa energiaa siirtyy enemmän energiaa sisältäviltä partikkeleilta vähemmän energiaa sisältäville partikkeleille, partikkelien välisessä vuorovaikutuksessa. Lämpimämmät partikkelit sisältävät enemmän energiaa, joten siirtyminen tapahtuu lämpimämmästä kylmempään. (Incropera et al. 2013, s. 3)



Kuva 2 Lämpöä johtuu kiinteässä aineessa molekyilien värähtelyn ja vapaiden elektronien liikkeen seurauksena (alkuperäinen lähde Çengel ja Ghajar 2015 s.21).

Materiaaleille on määritelty lämmönjohtavuuden arvo (λ), joka kuvaa materiaalin kykyä johtaa lämpöä. Arvo ilmoittaa lämpömäärän suuruuden (W), joka aikayksikössä läpäisee pinta-alayksikön suuruuden ja pituusyksikön paksuuden (m) materiaalikerroksen, kun materiaalin eri puolilla vallitsee lämpötilayksikön suuruinen lämpötilaero (K). (RIL 255, s. 390) Mitä korkeampi arvo on, sitä paremmin materiaali johtaa lämpöä. Lämmönjohtavuuden arvo on riippuvainen sekä lämpötilasta että kosteudesta. Joidenkin materiaalien lämmönjohtavuuden arvoon lämpötilalla ja kosteudella on huomattavasti enemmän vaikutusta kuin toisten. Anisotrooppisilla materiaaleilla, kuten puu ja mineraalivilla, lämmönjohtavuuden arvo on erisuuruinen eri suuntaan. (Çengel ja Ghajar 2015, s. 23)

Materiaalin lämmönjohtavuudella on suuri merkitys siihen, miten ihminen aistii tietyn aineen lämpötilan. Jos ihminen esimerkiksi seisoo siten, että toinen jalka on keraamisen lattialaatan päällä ja toinen jalka korkkilattian päällä, tuntuu laatta kylmemmältä, vaikkakin molemmat materiaalit ovat samassa lämpötilassa. Syy tähän on, että laatta johtaa lämpöä huomattavasti paremmin kuin korkki. Tai toisinpäin: laatta eristää lämpöä huonommin kuin korkki. (Serway ja Jewett 2010, s. 544)

Lämmön siirtyminen johtumalla homogeenisessa ja isotrooppisessa materiaalissa ilmoitetaan (3-dimensioisessa tapauksessa) Fourierin lailla: (Hagentoft 2001, s. 15)

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (3)$$

jossa

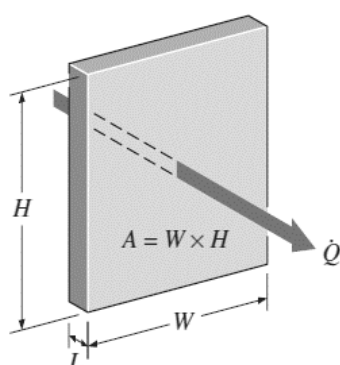
λ on materiaalin lämmönjohtavuus, W/mK

Kun yhdistetään energian säilymislaki, sekä Fourierin laki, saadaan lämmön johtumiselle ajasta riippuvainen yhtälö: (Hagentoft 2001, s. 34)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Kuvitellaan kiinteää ainetta (solidi) oleva laatta, jonka paksuus on L ja pinta-ala A (pinta-ala aina kohtisuorassa lämpövirran suuntaan) (Kuva 3). Lämpötila laatan alla on T_1 ja laatan päällä T_2 . Fourierin lain mukaan yksiulotteisessa ajasta riippumattomassa tapauksessa laatan läpi johtuvalle lämpövirralle saadaan yhtälö ($q = Q/A$): (Hagentoft 2001, s. 161)

$$Q = \lambda \times \frac{T_2 - T_1}{L} \times A \quad (5)$$



Kuva 3 Lämmön johtuminen laatan läpi (Çengel ja Ghajar 2015, s. 19).

Materiaalille voidaan myös määrittää lämmönvastusta kuvaava arvo R , yksikkönä $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$. Lämmönvastus saadaan jakamalla materiaalin paksuus sen lämmönläpäisykertoimen arvolla:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (6)$$

Jos rakenteessa on useampia materiaalikerroksia, joiden lämmönjohtavuuden arvot ovat erisuuruisia, saadaan koko rakenteen lämmönvastus lisäämällä materiaalikerrosten lämmönvastukset keskenään:

$$R_{\text{rakenne}} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (7)$$

Rakennusmateriaaleja, jotka johtavat lämpöä hyvin, toisin sanoen eristävät lämpöä huonosti, ovat esimerkiksi erilaiset metallit, kuten alumiini ($\lambda = 160 \text{ W/mK}$) ja kupari ($\lambda = 380 \text{ W/mK}$). Huonosti lämpöä johtavia, hyvin lämpöä eristäviä materiaaleja, ovat puolestaan

huokoiset materiaalit kuten puu ($\lambda = 0,12 \text{ W/mK}$) ja mineraalivilla ($\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$). (RIL 255)

2.1.2 Säteily

Lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, jota esiintyy kaikkien kappaleiden välillä. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on korkeampi kuin absoluuttinen nollapiste, lähettävät (emittoivat) säteilyä. Toisin kuin konvektiossa ja johtumisessa, säteily ei vaadi väliainetta edetäkseen. Säteily on lämmönsiirtotavoista nopein, koska siinä lämpö siirtyy valonnopeudella (Çengel ja Ghajar 2015, s. 27). Säteily aiheutuu kappaleessa olevien varattujen hiukasten (protonien) liikkeestä (Hagentoft 2001, s. 4, 46; Siikanen 2014, s. 40)

Lämpösäteily selittää esimerkiksi sen, miksi pilvettöminä öinä lämpötila laskee enemmän kuin pilvisinä öinä. Pilvissä oleva vesihöyry absorboi osan maan lähettämästä lämpösäteilystä ja emittoi sen takaisin maahan, jolloin ilman lämpötila pysyy lähes muuttumattomana. Pilvettömällä säällä maan emittoima lämpösäteily pääsee karkaamaan avaruuteen, jolloin lämpötila viilenee. (Serway ja Jewett 2010, s. 588)

Rakennusfysiikassa keskitytään auringon lyhytaaltoiseen sekä kappaleiden emittoimaan pitkäaaltoiseen säteilyyn (Siikanen 2014, s. 40). Lämpösäteilyn aallonpituus on välillä $0,1 - 100 \text{ }\mu\text{m}$. Tämä vaihteluväli korreloi kappaleen emittoiman säteilyn määrää lämpötilavälillä $-100 - 10000 \text{ }^\circ\text{C}$. Silmillä nähtävissä olevan lämpösäteilyn aallonpituus on välillä $0,4 - 0,7 \text{ }\mu\text{m}$. (Hagentoft 2001, s. 46)

Säteilyä läpäisemättömien rakennusmateriaalien kohdalla (metalli, puu tms.) säteilyä pidetään yleensä materiaalien pinnalla tapahtuvana ilmiönä, koska materiaalien sisempien osien emittoima säteily ei koskaan saavuta materiaalin pintaa (Çengel ja Ghajar 2015, s. 28). Toisin sanoen pitkäaaltoista lämpösäteilyä tarkasteltaessa, voidaan kaikkien rakennusmateriaalien todeta olevan säteilyä läpäisemättömiä (Hagentoft 2001, s. 46).

Osueessaan kappaleen pintaan, osa säteilystä heijastuu takaisin (ρ), osa absorboituu kappaleeseen (α) ja osa läpäisee kappaleen (τ): (Hagentoft 2001, s. 46)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (8)$$

Mustaksi kappaleeksi kutsutaan pintaa, joka emittoi säteilyä enemmän kuin mikään muu pinta (Kuva 4). Emittoidun säteilyn määrä riippuu Planckin lain mukaan säteilyn aallonpituudesta ja aallonpituus puolestaan Wienin siirtymälain perusteella kappaleen pinnan lämpötilasta. Musta kappale myös absorboi kaiken sen pintaan tulevan säteilyn, riippumatta säteilyn aallonpituudesta tai suunnasta. (Hagentoft 2001, s. 48) Mustan kappaleen pinnalta lähtevälle lämpösäteilylle saadaan Stefan-Boltzmanin lailla, kun $\varepsilon = 1$ ($q = Q/A$): (Çengel ja Ghajar 2015, s. 28)

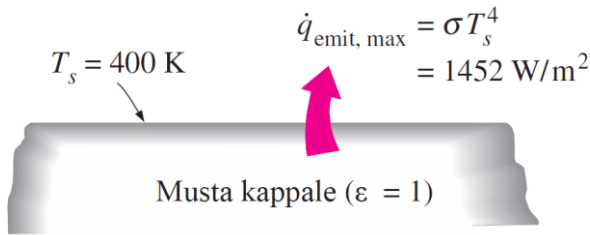
$$Q = \sigma AT^4, \quad (9)$$

jossa

σ on Stefan-Boltzmanin vakio, $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

T on pinnan lämpötila, K

A on pinta-alayksikkö, m^2 .



Kuva 4 Mustan kappaleen emittoiman lämpösäteilyn maksimimäärä tietyssä lämpötilassa (Alkuperäinen lähde Çengel ja Ghajar 2015, s. 28).

Todellinen kappale emittoi säteilyä vähemmän kuin samassa lämpötilassa oleva musta kappale. Todellisen kappaleen emittoimalle säteilylle saadaan yhtälö

$$Q = \varepsilon \sigma A T^4, \quad (10)$$

jossa

ε on todellisen kappaleen pinnan emissiivisyys, -.

Materiaalin emissiivisyys kertoo materiaalin kyvyn emittoida säteilyä suhteessa mustaan kappaleeseen. Mustan kappaleen emissiivisyys on $\varepsilon = 1$. Todellisten materiaalien emissiivisyys liikkuu välillä $0 \leq \varepsilon \leq 1$. (Çengel ja Ghajar 2015, s. 28)

Materiaalin ominaisuutta absorboida säteilyä kuvataan absorptiokerroimella α . Absorptiokerroin kertoo, kuinka suuri osa materiaalin pintaan kohdistuneesta säteilystä absorboituu kappaleeseen. Kuten emissiivisyys, myös absorptiokerroin saa arvoja välillä $0 \leq \alpha \leq 1$. (Çengel ja Ghajar 2015, s. 28)

Kahden eri lämpötilassa olevan kappaleen välillä tapahtuu lämmönsiirtymistä pitkäaaltoisen säteilyn välityksellä. Kappaleiden lämpötilojen (T_1 ja T_2) ollessa samaa suuruusluokkaa, saadaan kappaleesta yksi kappaleeseen kaksi kohdistuvan lämpösäteilyn määrälle yhtälö (Hagentoft 2001, s. 52)

$$Q_{12} = \alpha_r A_1 (T_1 - T_2) \quad (11)$$

$$\alpha_r = \frac{4\sigma \bar{T}_{1,2}^3}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \frac{A_1}{A_2}} \quad (12)$$

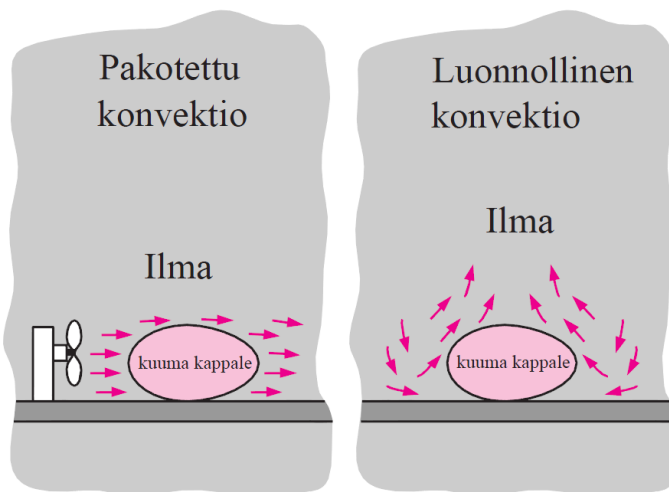
$$\bar{T}_{1,2} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (13)$$

Yhtälöissä A_1 ja A_2 ovat kappaleiden pinta-alat (m^2), ε_1 ja ε_2 ovat pintojen emissiivisyydet, α_r on säteilyn lämmönsiirtokerroin ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), F_{12} on näkyvyyskerroin, joka huomioi pintojen koon sekä pintojen asennon toisiinsa nähden. Yhtä suurille ja yhdensuuntaisille tasoille pätee $F_{12} = 1$ sekä $A_1 = A_2$. (Hagentoft 2001, s. 52)

2.1.3 Konvektio

Konvektiolla lämpöä siirtyy esimerkiksi tuulen vaikutuksesta aineen pinnalta ympäristöön, mutta konvektiolla on suuri merkitys myös lämmönsiirtymisessä huokoisen aineen läpi tai sen sisässä. Konvektiossa lämpöä siirtyy nesteen tai kaasun (fluidin) virtauksen mukana ja rakennusfysiikan näkökulmasta tämä aine on yleensä ilma. (Hagentoft 2001, s. 4) Erikoistapauksessa väliaineena saattaa toimia myös joku muu kaasu (esimerkiksi ikkunalasien välissä) tai vesi. Mitä nopeampi fluidin vauhti on, sitä enemmän lämpöä siirtyy (Çengel ja Ghajar 2015, s. 25).

Konvektio jaetaan tavallisesti kahteen eri kategoriaan: luonnolliseen konvektioon ja pakotettuun konvektioon (Kuva 5). Luonnollinen konvektio aiheutuu lämpötilaeron aiheuttamasta ilman tiheyserosta ja pakotettu konvektio esimerkiksi tuulen tai laitteiden aiheuttamasta ilmanpaine-erosta (esim. koneellinen ilmanvaihto). (Hagentoft 2001, s. 42) Useissa käytännön tapauksissa puhutaan näiden kahden yhdistelmästä.



Kuva 5 Pakotettu konvektio ja luonnollinen konvektio (Alkuperäinen lähde Çengel ja Ghajar 2015, s. 26).

Luonnollisen konvektion havaitsee esimerkiksi, jos pitää käsiään nuotion yläpuolella. Tuli lämmittää nuotion yläpuolista ilmaa, jolloin ilman tilavuus kasvaa, eli tiheys pienenee ja lämmennyt ilma nousee ylöspäin. Vastaava ilmiö tapahtuu myös keitettäessä vettä kattilassa. Kattila lämmittää aluksi pohjalla olevan veden, jonka jälkeen sen tiheys alenee ja se nousee pintaan. Tällöin pinnassa ollut kylmä vesi vajoaa kattilan pohjalle lämmitettäväksi. (Serway ja Jewett 2010, s. 588)

Konvektiossa lämpöä kulkeutuu nesteen tai kaasun ominaislämpökapasiteetin kannattelemana paikasta A paikkaan B. Fluidin kuljettaessa lämpöä eri lämpötilassa olevan kiinteän pinnan ohi, lämpöä siirtyy pinnasta fluidiin tai fluidista pintaan. (Hagentoft 2001, s. 4) Konvektiivisen lämpövirran yhtälö saadaan ilmaistua Newtonin jäähdytyslain avulla: (Hagentoft 2001, s. 43)

$$q_{\text{konvektio}} = h \times (T_{\text{pinta}} - T_{\text{fluidi}}), \quad (14)$$

jossa

$q_{\text{konvektio}}$ on lämpövirran suuruus, W/m²

h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, W/m²K

$T_{\text{pinta}} - T_{\text{fluidi}}$ on pinnan ja fluidin välinen lämpötilaero, K.

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin määritetään yleensä ilmavirran tyypin mukaan. (Hagentoft 2001, s. 43) Kerroin ei kuitenkaan ole fluidin ominaisuus, vaan kokeellisesti määritetty parametri, johon vaikuttaa mm. pinnan geometria, karheus sekä virtaavan aineen ominaisuudet ja nopeus. Laskennan helpottamiseksi ja muuttujien vähentämiseksi lämmönsiirtokerroin h , voidaan muuttaa dimensiottomaksi Nusseltin numeroksi Nu , joka on sitä isompi mitä tehokkaampaa konvektiivinen lämmönsiirto on: (Çengel ja Ghajar 2015, s. 26)

$$Nu = \frac{hL_c}{\lambda}, \quad (15)$$

jossa

h on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, W/m²K

L_c on karakteristinen pituus, m

λ on fluidin lämmönjohtavuus, W/mK.

Yksinkertaistettuna rakennusfysiikan perussovelluksissa voidaan käyttää Hagentoftin (2001, s. 43) määrittelemiä lämmönsiirtokerrointen arvoja, jotka saadaan laskettua kaavoista 16 ja 17. Kaavojen ehtona on, että ilmavirran nopeus u tiedetään sekä virtaus on pakotettua ja pinnan kanssa yhdensuuntaista.

$$h = 6 + 4 \times u, \quad \text{kun } u \leq 5 \text{ m/s.} \quad (16)$$

$$h = 7,41 \times u^{0,78}, \quad \text{kun } u \geq 5 \text{ m/s.} \quad (17)$$

Rakenteen ulkopinnalla (kun tuulennopeus v tiedetään) voidaan kertoimelle α_c käyttää alla olevia arvoja:

Tuulenpuolella:

$$h = 5 + 4,5 \times v - 0,14 \times v^2, \quad \text{kun } v \leq 10 \text{ m/s.} \quad (18)$$

Suojanpuolella:

$$h = 5 + 1,5 \times v, \quad \text{kun } v \leq 8 \text{ m/s.} \quad (19)$$

Rakenteen sisäpinnalla, konvektion ollessa luonnollista, voidaan lämmönsiirtokerrointen arvona käyttää

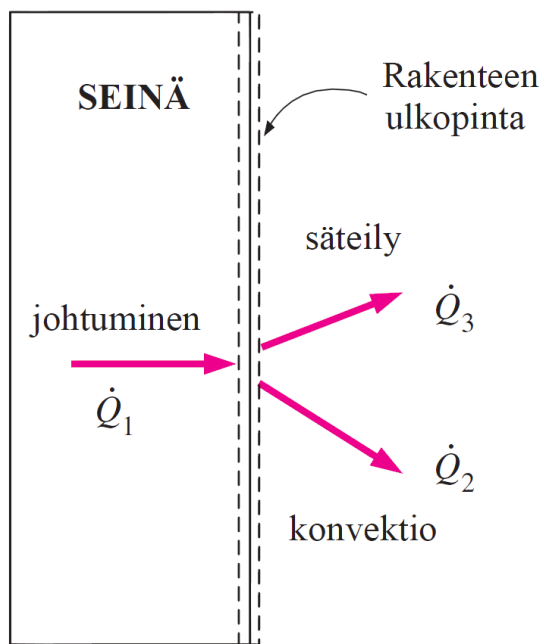
$$h = 2 \times |T_a - T_s|^{\frac{1}{4}} \quad (20)$$

Konvektiovirtaukset rakenteen läpi tapahtuvat yleensä

- ilmanvaihtokanavia pitkin
- huokoisen eristemateriaalin läpi (esim. mineraalivilla)
- rakenteessa olevien rakojen tai halkeamien läpi (esim. raot höyrynsulussa tai halkeamat betoni-/puurakenteessa).

2.1.4 Yhdistetty lämmönsiirtyminen

Käytännön sovelluksissa lämpöä siirtyy kaikilla kolmella eri tavalla samanaikaisesti. Tarkastellaan betonista seinärakennetta, johon ei prosessin aikana siirry lisälämpöä esimerkiksi auringonsäteilyn vaikutuksesta. Lämpöä siirtyy rakenteen lämpimämmältä puolelta kylmemmälle puolelle pääasiassa johtumalla. Kun siirtyvä lämpövuoto saavuttaa rakenteen ulkopinnan, siirtyy se pinnalta pois sekä konvektion että säteilyn avulla (Kuva 6). Käytännön tilanteissa materiaalin pinnalta siirtyy lämpöä sekä ilmavirtojen/tuulen vaikutuksesta (konvektio) että säteilemällä ympäristöön/taivaalle.



Kuva 6 Lämpöä siirtyy seinärakenteen läpi johtumalla. Rakenteen ulkopinnalta lämpöä siirtyy ympäristöön konvektiolla sekä säteilemällä (muokattuna lähteestä Çengel ja Ghajar 2015, s. 14).

Seinän pinnalta ympäristöön siirtyvälle, yhdistetylle lämpövuolle on annettu yhtälö ($Q = q \cdot A$): (Incropera et al. 2013, s. 10)

$$\begin{aligned} q_{\text{tot}} &= q_{\text{konvektio}} + q_{\text{säteily}} \\ &= h \times (T_{\text{pinta}} - T_{\text{fluidi}}) + \varepsilon \times (T_{\text{pinta}}^4 - T_{\text{ympäristö}}^4) \end{aligned} \quad (21)$$

2.2 Lämmön varastoituminen materiaaliin

Kun systeemiin lisätään energiaa (lämmitetään), systeemin liike- ja potentiaalienergian sekä olomuodon pysyessä vakiona, systeemiin varastoituu energiaa ja systeemin lämpötila nousee. (Serway ja Jewett 2010, s. 568)

Materiaalin ominaislämpökapasiteetti kuvaa sitä, kuinka paljon energiaa (Q , yksikkö J) tarvitaan nostamaan aineen, jota on massayksikön verran (m , yksikkö kg), lämpötilaa yhdellä asteella (T , yksikkö °C) (Kuva 7). Vakiopaineessa ominaislämpökapasiteetin tunnuksena on

c_p ja yksikkönä $\text{J/kg}^\circ\text{C}$. Mitä suurempi ominaislämpökapasiteetti, sitä enemmän energiaa tarvitaan nostamaan materiaalin lämpötilaa. Ominaislämpökapasiteetin arvoon vaikuttaa materiaalin lämpötila, mutta lämpötilan vaikutus on niin pieni, että se jätetään usein huomioidmatta. Materiaalin ominaislämpökapasiteetti saadaan laskettua yhtälöstä (Serway ja Jewett 2010, s. 569):

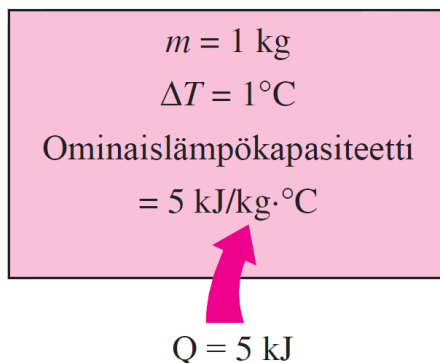
$$c_p = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (22)$$

jossa

Q on materiaalin lämmittämiseen käytettävä energia, J

m on materiaalin massa, kg

ΔT on lämpötilan muutos, $^\circ\text{C}$.



Kuva 7 Ominaislämpökapasiteetti kuvaa, kuinka paljon energiaa tarvitaan nostamaan yhden massayksikön painoisen kappaleen lämpötilaa yhdellä asteella (Alkuperäinen lähde Çengel ja Ghajar 2015, s. 7).

Ominaislämpökapasiteetilla kuvataan myös materiaalin kykyä varastoida lämpöä itseensä. Korkean ominaislämpökapasiteetin omaava materiaali varastoi lämpöä huomattavasti enemmän kuin matalan ominaislämpökapasiteetin omaava materiaali. (Çengel ja Ghajar 2015, s. 7) Veden ominaislämpökapasiteetti on korkein tavanomaisista materiaaleista. Rakennusmateriaaleista korkea ominaislämpökapasiteetti on esimerkiksi puulla. Tämän takia paksun hirsiseinän voidaan sanoa varastoivan lämpöä hyvin. Metallien ominaislämpökapasiteetit ovat tavallisesti matalia. (RIL 255, s. 432 – 434)

Materiaalille voidaan lisäksi antaa lämpökapasiteetin arvo, joka ilmoittaa varastoituneen energiamäärän tilavuusyksikköä (m^3) kohti. Lämpökapasiteetti saadaan kertomalla ominaislämpökapasiteetti (c_p) materiaalin tiheydellä (ρ). Lämpökapasiteetti esiintyy usein laskennassa ja mallinnuksessa, koska sillä saadaan huomioitua lämmön varastoituminen materiaaliin lämmönsiirtymisen yhteydessä. (Çengel ja Ghajar 2015, s. 23)

2.3 Kosteuden siirtyminen huokoisessa aineessa

Tässä luvussa kosteudella tarkoitetaan materiaalissa tai sen pinnalla olevaa kemiallisesti sitoutumatonta vettä, joka on joko kaasumaisessa (vesihöyry) tai nestemäisessä muodossa. Kosteutta voi esiintyä rakennusmateriaaleissa myös kemiallisesti sitoutuneena tai jäänä (Siikanen 2014, s. 65).

Rakennusfysiikassa kosteuden siirtymistä kuvataan massan siirtymisellä. Kuten lämmön siirtymisessä, myös massan siirtymisessä lähtökohtana toimivat termodynamiikan peruslait.

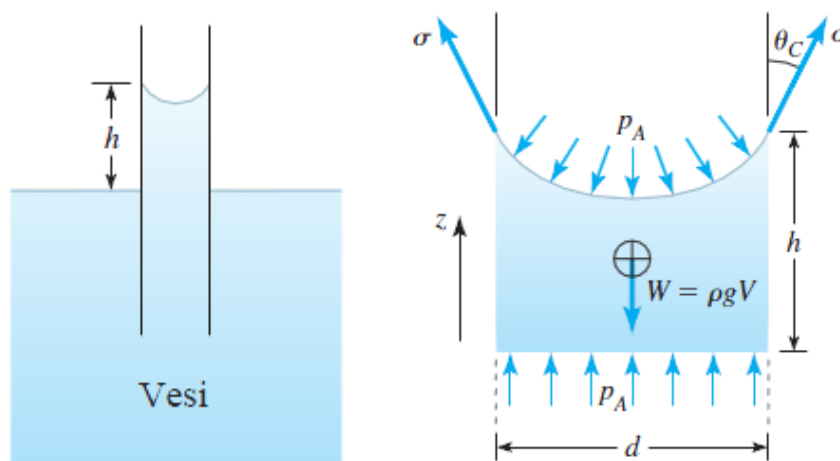
Lämmön siirtymisessä käynnistävänä tekijänä toimi lämpötilaero, mutta massan siirtymisessä konsentraatioero. Jos rakenteen eri puolilla on sama kosteuspitoisuus, ei kosteuden siirtymistä tapahdu. (Çengel ja Ghajar 2015, s. 720)

Kosteutta rakennusmateriaaleissa voi siirtyä

- painovoiman vaikutuksesta alaspäin
- kapillaarisesti kaikkiin suuntiin
- diffuusiolla
- konvektiolla.

2.3.1 Kapillaari-ilmiö

Kapillaari-ilmiö kuvaa tilannetta, jossa nestettä siirtyy ohuessa putkessa vettymisilmiön seurauksena painovoimaa vastaan (*Kuva 8*). Mitä ohuempi putki on, sitä korkeammalle vesipatas nousee. Veden kapillaarinen liike loppuu, kun vesimassaan kohdistuvan painovoiman suuruus ylittää kapillaari-imuvoiman vaikutuksen. Kapillaarista liikettä voi tapahtua mihin suuntaan tahansa. (Shaugnessy et al. 2005, s. 90) Liike on kuitenkin heikointa ylöspäin, jolloin painovoiman sitä vastustava vaikutus on suurin.



Kuva 8 Kapillaari-ilmiö nostaa vesipatsaan putken sisällä korkeammalle kuin ympäröivän veden pinta (muokattuna lähteestä Shaugnessy et al. 2005, s. 90)

Kapillaariselle imulle, eli negatiiviselle paineelle on annettu yhtälö: (Hagentoft 2001, s. 99)

$$p = \frac{2\sigma}{r} \times \cos \theta, \quad (23)$$

jossa

r on kapillaariputken säde, m

σ on rajapinnan pintajännitys, N/m

θ on vedenpinnan koveruuden ja putken seinämän välinen kontaktikulma.

Normaalille rakennusmateriaalille kontaktikulma θ on lähellä nollaa ja pintajännityskerroin σ on 0,073 N/m, kun lämpötila on 20 °C. Tästä saadaan vesipatsaan korkeudelle yhtälö: (Hagentoft 2001, s. 99)

$$Hg\rho_{\text{water}} = p = \frac{2\sigma}{r}, \quad (24)$$

jossa

$$H = \frac{2\sigma}{rg\rho_{\text{water}}} \quad (25)$$

Materiaalin ollessa kosketuksissa vapaan veden kanssa, lasketaan kapillaarisen kosteusvirran tiheys yhtälöstä: (Hagentoft 2001, s. 101)

$$g = \frac{A_w}{2\sqrt{t}}, \quad (26)$$

jossa

g on kosteusvirran tiheys, $\text{kg/m}^2\text{s}$

A_w on materiaalin veden imeytymiskerroin (kapillariteettikerroin), $\text{kg/m}^2\text{s}^{0,5}$

t on aika, s.

Tietyllä aikavälillä (t) materiaalin itseensä kapillaarisesti imemän veden määrä (kg/m^2) saadaan yhtälöstä: (Hagentoft 2001, s. 101)

$$\int_0^t g dt = A\sqrt{t} \quad (27)$$

Materiaalin kapillaarisesti kyllästetyn osan rajapinnan sijainti ajan suhteen (t) saadaan yhtälöstä: (Hagentoft 2001, s. 101)

$$x_p = B \times \sqrt{t}, \quad (28)$$

jossa

B on veden tunkeutumiskerroin, $\text{m/s}^{0,5}$.

Kun yhdistetään kaavat 26 ja 28, ja rajapinnan sijainti x_p asetetaan vastaamaan materiaalin paksuutta (d), saadaan kosteusvirran tiheydelle yhtälö: (Hagentoft 2001, s. 101)

$$g = \frac{A_w B}{2d} \quad (29)$$

Rakennusfysiikassa kapillaarisuudella tarkoitetaan veden liikettä huokoisen rakennusmateriaalin huokosissa, joita voidaan verrata joukkoon kapillaariputkia. Se kuinka paljon materiaali pystyy imemään kapillaarisesti kosteutta itseensä, riippuu materiaalin huokosjakaumasta tai maa-aineksen tapauksesta sen raejakaumasta. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että mitä hienorakeisempaa materiaali on, sitä enemmän vettä siihen kapillaarisesti imeytyy. (YM 2015) Hienorakeisessa materiaalissa vesi voi nousta kapillaarisesti jopa satoja metrejä, kun esimerkiksi tietynlaisessa sorassa nousukorkeus on vain joitakin senttimetrejä. (Hagentoft 2001, s. 100; Leivo ja Rantala 2002, julkaisu 120 s. 14; Siikanen 2014, s. 68; RIL 255)

2.3.2 Diffuusio

Diffuusio kuvaa kaasumaisen veden (vesihöyryn) liikettä rakenteen läpi. Diffuusio aiheutuu kaasun osapaine-eroista rakenteen eri puolilla. Kaasumolekyylien liike pyrkii tasaamaan osapaine-erot. Diffuusiosta vesihöyry liikkuu korkeammasta osapainepitoisuudesta matalampaan, mikä tarkoittaa yleensä liikettä lämpimämmästä kylmempään. (Siikanen 2014, s. 71) Kiinteässä ja halkeilemattomassa materiaalissa diffuusiota tapahtuu ainoastaan aineen huokosten sisällä. Esimerkiksi ehjässä betonissa kosteutta pääsee siirtymään diffuusiolla vain, jos betonissa on riittävästi vesihöyryn liikkeen sallivia huokosia. (Neville 2011, s. 487)

Tarkastellaan seisovaa ilmakerrosta, jonka paksuus on dx . Ilmakerroksen eri puolilla vaikuttaa dv suuruinen konsentraatioero. Yksidimensioisessa stationääritilassa diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran (g) suuruus ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$) saadaan Fick:n ensimmäisen lain mukaan kaavasta (Hagentoft 2001, s. 93)

$$g = -D \times \frac{dv}{dx}, \quad (30)$$

jossa

D on 20 °C ilman vesihöyryn diffusiviteetti, $25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

dv on vesihöyrypitoisuuksien ero, kg/m^3

dx on ilmakerroksen paksuus, m.

Yhtälöstä 30 saadaan rakennusfysiikan sovelluksiin paremmin sopiva muoto: (Hagentoft 2001, s. 96)

$$g = \delta_v \times \frac{v_1 - v_2}{d}, \quad (31)$$

jossa

δ_v on materiaalin vesihöyrynläpäisevyys, m^2/s

v_1 ja v_2 ovat vesihöyrypitoisuudet materiaalin eri puolilla, kg/m^3

d on materiaalin paksuus, m.

Materiaalin vesihöyrynläpäisevyydellä ja paikallaan olevan ilman vesihöyrynläpäisevyydellä on yhteys: (Hagentoft 2001, s. 96)

$$\mu = \frac{D}{\delta_v}, \quad (32)$$

jossa

μ on ilman ja materiaalin diffusiviteettien välinen suhdeluku eli diffuusionvastuskerroin, -.

Tietyn paksuisen materiaalin vesihöyrynvastus saadaan vesihöyrynläpäisevyydestä vastaavasti kuin lämmönsiirtymisen tapauksessa:

$$Z = \frac{d}{\delta}, \quad (33)$$

jossa

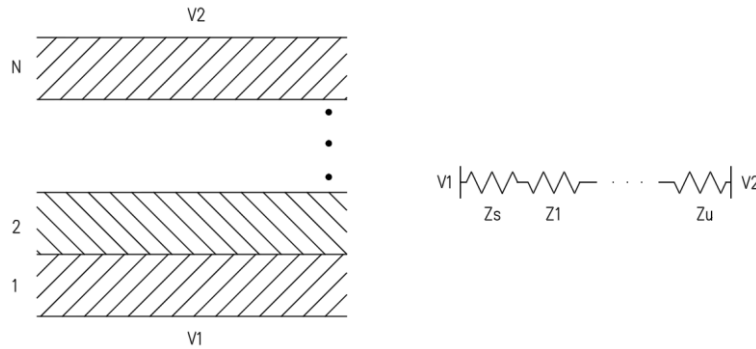
d on rakenteen tai materiaalin paksuus, m.

Stationääritilassa kosteusvirran tiheyttä kuvataan yleensä yksidimensioisessa tapauksessa, juurikin vesihöyrynvastuksen Z suhteen: (Hagentoft 2001, s. 97)

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z} \quad (34)$$

Jos rakenteessa on useampia materiaalikerroksia, käsitellään kosteusvirtaa rakenteen läpi vastaavasti kuin lämmön johtumisen tapauksessa (Kuva 9). Rakenteen sisä- (Z_s) ja ulkopinnan (Z_u) sekä materiaalikerrosten vesihöyrynvastukset lasketaan yhteen, jolloin saadaan koko rakenteen vesihöyrynvastukselle yhtälö: (Hagentoft 2001, s. 98)

$$g = \frac{v_1 - v_2}{Z_{v.\text{tot}}}, \quad \text{jossa } Z_{v.\text{tot}} = (Z_s + Z_u) + \sum_{i=1}^n Z_i \quad (35)$$



Kuva 9 Useista eri materiaalikerroksista koostuvan rakenteen vesihöyrynvastuksen määrittäminen (muokattuna lähteestä Hagentoft 2001, s. 98).

Yleisesti on käytössä kaksi eri yksikkömallia, joilla kuvataan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyteen/-vastukseen liittyviä arvoja. Yksiköt ilmaistaan joko vesihöyrypitoisuuseron tai vesihöyryn osapaine-eron suhteen. Esimerkiksi materiaalin vesihöyrynläpäisevyys voidaan joko

- vesihöyrypitoisuuseron suhteen δ_v , yksikkönä m^2/s
- vesihöyryn osapaine-eron suhteen δ_p , yksikkönä $\text{kg}/(\text{msPa})$.

Vesihöyryn siirtymiseen liittyviä muunnoskaavoja on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 1).

Taulukko 1 Materiaalien muunnoskaavoja (RIL 255, s. 393).

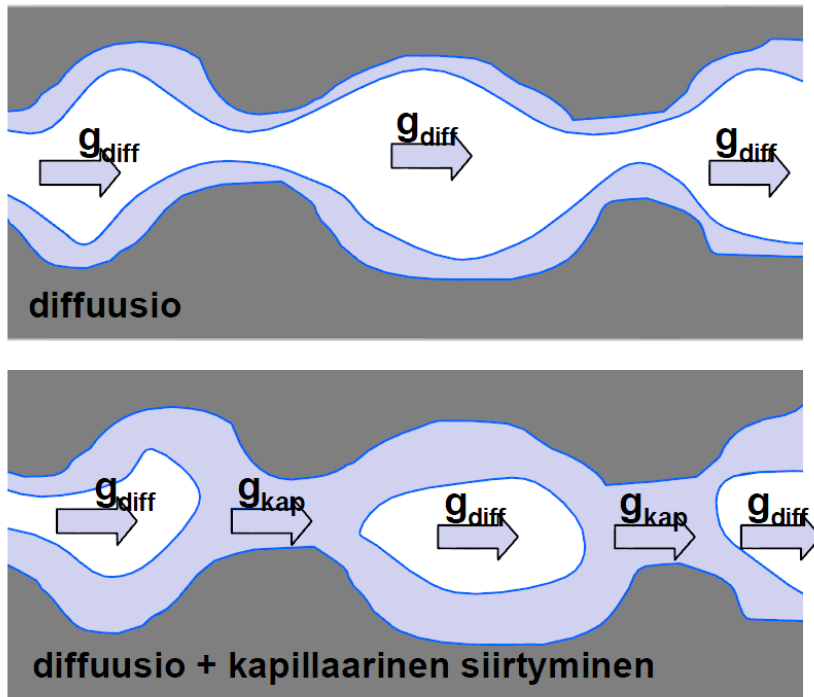
Ominaisuus	Kaava	Yksikkö
Vesihöyrynläpäisevyys, δ_v	$\delta_v = \delta_p \left(\frac{R}{M_w} \right) (273,15 + t)$	m^2/s
Vesihöyrynläpäisevyys, δ_p	$\delta_p = \frac{\delta_v}{\left(\frac{R}{M_w} \right) (273,15 + t)}$	$\text{kg}/(\text{msPa})$
Vesihöyrynläpäisykerroin, W_v	$W_v = W_p \left(\frac{R}{M_w} \right) (273,15 + t)$	m/s

Vesihöyrynläpäisykerroin, W_p	$W_p = \frac{W_v}{\left(\frac{R}{M_w}\right)(273,15 + t)}$	kg/m ² sPa
Vesihöyrynvastus, Z_v	$Z_v = \frac{d}{\delta_v} = \frac{1}{W_v}$	s/m
Vesihöyrynvastus, Z_p	$Z_p = \frac{d}{\delta_p} = \frac{1}{W_p}$	m ² sPa/kg
Diffuusiovastuskerroin, μ	$\mu = \frac{\delta_{v,a}}{\delta_v} = \frac{\delta_{p,a}}{\delta_p}$	-
Suhteellinen diffuusiovastus, S_d	$S_d = \mu \times d$	m

Diffuusion lisäksi rakennusfysiikassa puhutaan myös termodiffuusiosta sekä effuusiosta. Termodiffuusioksi kutsutaan prosessia, jossa ei-isotermisissä olosuhteissa, kun lämpötilan vaihtelut otetaan huomioon, vesimolekyylit liikkuvat kohti materiaalin lämpimimpiä osia. Kevyet vesimolekyylit työntyvät lämpimälle puolelle, kun samaan aikaan painavimmat il-
mamolekyylit liikkuvat kylmempiä osia kohti. Termodiffuusio selittää esimerkiksi sen, miksi rakenteen kylmät osat vetävät puoleensa ilmassa leijuvia pölyhiukkasia. Effuusioksi kutsutaan vesihöyryyn siirtymistä huokoisen materiaalin huokosten sisällä molekyyliden tär-
mäilyssä huokosten seinämiin. Myös effuusiosta vesimolekyylit siirtyvät kylmemmästä lämpimämpään. Termodiffuusion ja effuusion vaikutus kosteudensiirtymisessä on kuitenkin
pieniä diffuusion verrattuna. (Hagentoft 2001, s. 292)

2.3.3 Yhdistetty kapillaarinen siirtyminen ja diffuusio

Mikroskooppisella tasolla tarkasteltuna vesihöyryä siirtyy huokoisen materiaalin vapaissa huokosissa diffuusion välityksellä (suhteellinen kosteus alhainen). Huokosten ollessa täysin kyllästyneitä vedestä, siirtyy kosteutta materiaalissa ainoastaan kapillaarisen imun vaikutuk-
sesta (suhteellinen kosteus korkea). Huokosten ollessa osittain kyllästyneinä vedestä, kos-
teutta siirtyy näiden kahden yhdistelmällä (*Kuva 10*). Diffuusiolla siirtyy kosteutta huomattavasti hitaammin kuin kapillaarisella imulla, joten alhaisessa kosteuspitoisuudessa materi-
aalin läpi siirtyy kosteutta hitaammin. Eri materiaaleilla kapillaarinen imu käynnistyy eri kosteuspitoisuuksissa. (Hagentoft 2001, s. 103)



Kuva 10 Kun huokoisen materiaalin huokosten suhteellinen kosteus on alhainen, kosteutta siirtyy ainoastaan diffuusion avulla. Kun RH nousee, kosteutta siirtyy sekä diffuusiolla että kapillaarisesti. (Alkuperäinen lähde Sjöberg 2001, muokattuna lähteestä Merikallio 2009)

Huokoisen materiaalin vesihöyrynläpäisevyydelle (δ_v) annetaan eri arvoja materiaalin suhteellisesta kosteudesta riippuen, vaikka vesihöyrynläpäisevyyden kasvaminen suhteellisen kosteuden noustessa johtuu todellisuudessa kapillaarisen kosteudensiirron lisääntymisestä materiaalin huokosissa. Vesihöyrynläpäisy hidastuu huomattavasti korkeammissa kosteuspitoisuuksissa, koska diffuusio veden läpi on neljä suuruusluokkaa (10^4) hitaampaa kuin ilman läpi. (Neville 2011, s. 487) Jos veden kapillaarinen siirtyminen sekä diffuusio halutaan huomioida erillisinä ilmiöitä, voidaan materiaalin vesihöyrynläpäisevyyden arvona käyttää kuivissa olosuhteissa annettua arvoa. Tällöin kapillaariselle siirtymiselle tulee käyttää omaa arvoa: kapillaarinen kosteuskonvektio, $D_{w,s}$ (yksikkö m^2/s). (RIL 255)

2.3.4 Kosteuskonvektio

Kosteutta siirtyy kapillaari-ilmiön ja diffuusion lisäksi myös fluidien, rakennusfysiikassa tavallisesti ilman, virtauksen mukana. Tätä ilmiötä kutsutaan vesihöyrynläpäisevyyden konvektioksi tai kosteuskonvektioksi. Kosteuskonvektiossa kosteutta siirtyy ilmavirran mukana rakenteen läpi, rakenteen eripuolilla vallitsevan paine-eron johdosta, suuremmasta paineesta pienempään. Pienenkin rakenteessa olevan epätiivetyyskohdan (esim. reikä höyrynsulussa) läpi saattaa siirtyä huomattavissa määrin kosteutta rakenteeseen. Kosteuskonvektiota esiintyy myös huokoisten eristekerrosten sisällä. (Siikanen 2014, s. 72)

Rakennuksen ollessa reilusti ylipaineinen ulkoilmaan nähden, haitallisen kosteuskonvektion määrä rakenteiden läpi lisääntyy. Rakenteen sisälle päässyt lämmin ja kostea sisäilma saattaa tiivistyä kosteudeksi törmätessään rakenteen sisällä olevaan viileään pintaan. Tästä syystä

rakennukset pyritään pitämään hieman alipaineisena, jotta konvektion suunta olisi mieluummin ulkoa sisälle päin. Ulkoa sisälle päin tuleva viileä ja kuiva ilma kuivattaa rakennetta.

Rakenteen pinnalta kosteutta siirtyy ympäröivään ilmaan lähes yksinomaan kosteuskonvektiolla (kun sisäilman kosteuspitoisuus on pienempi kuin rakenteen pinnan kosteuspitoisuus). Konvektiivinen kosteuden siirtymisen yhtälö on vastaavanlainen kuin lämmön siirtymisen tapauksessa: (Çengel ja Ghajar 2015, s. 721; Hagentoft 2001, s. 106)

$$g_{\text{konvektio}} = \beta_v \times (v_{\text{pinta}} - v_{\text{ympäristö}}), \quad (36)$$

jossa

$g_{\text{konvektio}}$ on pinnalta ympäristöön konvektiolla siirtyvän kosteusvirran suuruus, $\text{kg/m}^2\text{s}$

β_v on pinnan kosteudensiirtokerroin, m/s

$v_{\text{pinta}} - v_{\text{ympäristö}}$ on pinnan ja ympäröivän ilman välinen vesihöyrypitoisuusero, kg/m^3 .

Rakenteen pinnan kosteudensiirtokertoimen (yksikkö m/s) arvoon vaikuttavat samat tekijät kuin lämmönsiirtokertoimella. Lewisin kaavan mukaan kosteudensiirtokertoimen ja konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen välillä on yhteys: (Hagentoft 2001, s. 107)

$$\beta_v = \frac{h}{\rho_{\text{ilma}} c_{\text{ilma}}}, \quad (37)$$

jossa

h on pinnan konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, $\text{W/m}^2\text{K}$

ρ_{ilma} on ilman tiheys, $\sim 1,2 \text{ kg/m}^3$ ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)

c_{ilma} on ilman ominaislämpökapasiteetti, $\sim 1000 \text{ J/kgK}$ ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Laskennassa kosteuden siirtymistä tarkastellaan usein vesihöyrynpitoisuuseron sijaan vesihöyryn osapaine-eron suhteen, minkä johdosta kosteudensiirtokerroin ilmoitetaan yksikössä s/m (Künzel 1995, s. 31). Vesihöyryn osapaine-eron ja vesihöyrypitoisuuden välillä on yhteys, jonka avulla kertoimen yksikkö saadaan muutettua laskentaan sopivaksi:

$$\beta_v = \beta_p \cdot \frac{R}{M_w} \cdot T, \quad (38)$$

jossa

R on kaasuvakio, $\sim 8,314 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$

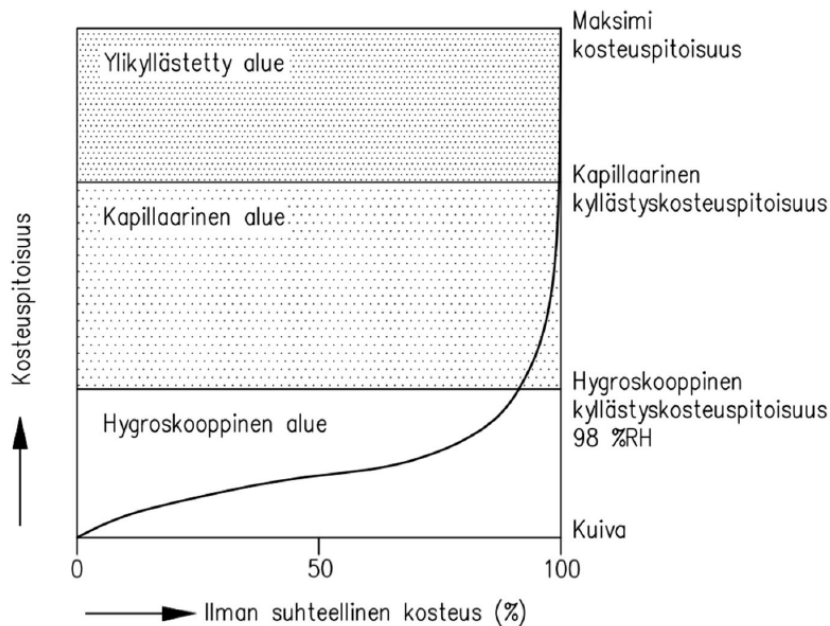
M_w on veden moolimassa, $\sim 18,02 \text{ g/mol}$

T on lämpötila, K .

2.4 Kosteuden sitoutuminen materiaaliin

Huokoisella materiaalilla on kyky sitoa kosteutta itseensä suoraan ilmasta tai vapaan veden lähteestä kuten pohja- tai orsivedestä. Materiaalilla on lisäksi tapana pyrkiä tasapainokosteuteen ympäristönsä kanssa, eli kosteutta siirtyy materiaalista ympäristöön tai toisin päin, niin kauan, kunnes kosteuspitoisuusero tasoittuu. Kosteuden sitoutuminen jaetaan tavalli-

sesti kolmeen eri alueeseen: Hygroskooppinen, kapillaarinen ja täysin kyllästynyt (ylikyllästetty) alue (Kuva 11). Suhteellisen kosteuden raja-alueita, jossa materiaali pystyy sitomaan kosteutta itseensä suoraan ympäröivästä ilmasta, kutsutaan materiaalin hygroskooppiseksi alueeksi. Hygroskooppinen alue on yleensä välillä 0 – 98 %. Kun hygroskooppisen alueen yläraja ylittyy, materiaali siirtyy kapillaariselle alueelle. Materiaali voi päästä kapillaariseen tasapainokosteuteen ollessaan kosketuksissa vapaan veden pintaan tai toiseen kapillaarisella alueella olevaan materiaaliin, kuten maaperään. Kun suhteellinen kosteus on tasan 100 % tai jopa sen yli, niin materiaali siirtyy kapillaarialueelta ylikyllästetylle alueelle. (Leivo ja Rantala 2002, julkaisu 121, s. 9; YM 2015; Künzeli 1995, s. 6 – 12)



Kuva 11 Periaatekuva materiaalin kosteuspitoisuudesta suhteellisen kosteuden funktiona sekä eri kosteuden sitoutumisalueista (lähteestä Heiskanen 2015, alkuperäinen lähde Künzeli 1995).

Kosteuden sitoutumisessa materiaalin huokosissa vaikuttavat vetovoimat vetävät ilman vesimolekyylejä huokosten pintaa kohti. Vesimolekyylit sitoutuvat materiaaliin joko adsorptiolla (hallitseva kun RH alhainen) tai kapillaarikondenssilla (hallitseva kun RH korkea). Vesimolekyylit muodostavat huokosen pintaan ohuen kerroksen, jonka paksuus riippuu ilman kosteudesta. Korkealla kosteuspitoisuudella kerroksen paksuus kasvaa ja matalalla pitoisuudella puolestaan ohenee. Se kuinka paljon kosteutta materiaali pystyy sitomaan, riippuu materiaalin ominaisuuksista. (Leivo ja Rantala 2002, julkaisu 120, s. 13)

Eri materiaalien hygroskooppisella kosteudella saattaa olla suuriakin eroja. Esimerkiksi kuivuva betoni ($v/s = 0,7$) sisältää kosteutta tasapainotilanteessa noin 96 kg/m^3 , kun taas EPS-lämmöneriste sisältää noin $0,27 \text{ kg/m}^3$, suhteellisen kosteuden ollessa 90 %. (Hagentoft 2001, s. 410 – 412) Mitä enemmän materiaali sitoo kosteutta hygroskooppisesti itseensä, sitä enemmän materiaali pystyy sitomaan kosteutta ympäröivästä ilmasta, ilman että kosteus aiheuttaa ongelmia materiaalille. (YM 2015)

Tasapainon saavuttaminen riippuu sekä lämpötilasta että suhteellisesta kosteudesta, mutta rakennusfysiikan sovelluksissa lämpötila voidaan yleensä jättää huomioimatta, koska sen

vaikutus kosteuspitoisuuteen on pieni. (Künzel 1995, s. 7; Hagentoft 2001, s. 90) Matalamassa lämpötilassa materiaaliin absorboituu tavallisesti enemmän vettä kuin korkeassa lämpötilassa. Veden määrää materiaalissa kuvataan tavallisesti kahdella eri tapaa: (YM 2015)

- veden määrä materiaalikuutiota kohden (w), kg/m^3
- veden prosentuaalinen osuus materiaalin kuivapainosta (u), %.

Materiaalille voidaan lisäksi määrittää, usein laskennassa käytetty differentiaalinen arvo, joka kuvaa materiaalin kykyä varastoida kosteutta itseensä. Arvolle suhteellisen kosteuden funktiona on annettu (Hagentoft 2001, s. 152)

$$\varepsilon = \frac{dw}{d\varphi}, \quad (39)$$

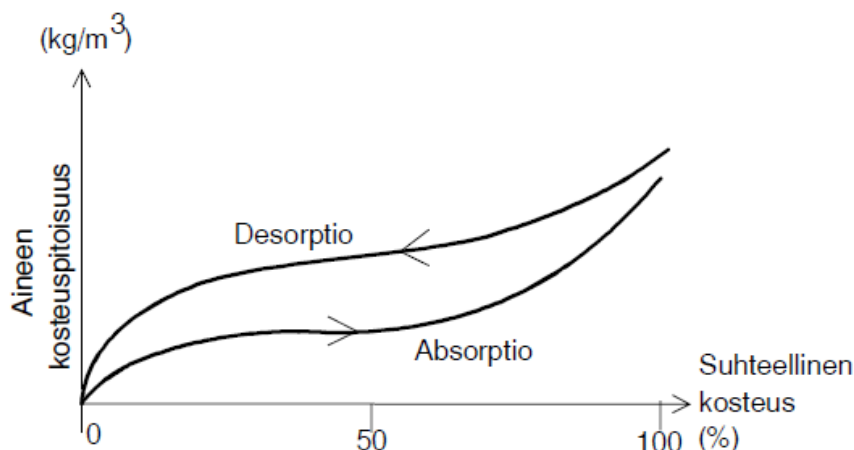
jossa

w on materiaalin kosteuspitoisuus, kg/m^3

φ on suhteellinen kosteus, %.

Materiaaleille voidaan määrittää myös tasapainokosteuskäyrät suhteellisen kosteuden funktiona, lämpötilan pysyessä muuttumattomana (*Kuva 12*). Lämpötilakäyrät on kirjallisuudessa esitetty yleensä $+23\text{ °C}$ lämpötilassa (YM 2015). Alkutilanteessa kuivan materiaalin alkaessa sitoa kosteutta itseensä, saadaan materiaalille kastumisen tasapainokäyrä, absorptiokäyrä. Kun täysin vedellä kyllästetty materiaali alkaa kuivua, saadaan materiaalille kuivumisen tasapainokäyrä, desorptiokäyrä. Absorptio käsittää yleensä sekä adsorption että kapillaarikondenssin. Käyrien kulmakertoimesta saadaan suoraan arvo ε materiaalin kyvylle varastoida kosteutta itseensä.

Tasapainokosteuskäyrä pystytään jakamaan kolmeen eri vaiheeseen kosteuden sitoutumismekanismien perusteella. Ensimmäisessä vaiheessa (kun RH on alhainen), yksittäiset vesimolekyylit kiinnittyvät materiaalin huokosten pinnalle huokosissa vallitsevien vetovoimien vaikutuksesta, jolloin kosteuspitoisuus nousee nopeasti (jyrkkä käyrä). Toisessa vaiheessa, kun vesimolekyyliryhmien adsorptio on hallitseva, kosteuspitoisuus nousee hitaasti. Viimeisessä vaiheessa, suhteellisen kosteuden ollessa korkea, kosteuden sitoutuminen kapillaarikondenssilla nousee hallitsevaksi, jolloin kosteuspitoisuus materiaalissa nousee nopeasti. (Leivo ja Rantala 2002, julkaisu 120, s. 13) Pienet materiaalihuokokset täyttyvät ensin, mutta korkealla suhteellisella kosteudella, myös isommat huokokset täyttyvät vedellä (Hagentoft 2001, s. 91).



Kuva 12 Erään materiaalin tasapainokosteuskäyrä (Leivo ja Rantala 2002, julkaisu 120, s. 14).

Syytä siihen, miksi kastumisella ja kuivumisella on erilainen tasapainokosteuskäyrä, ei tunneta tarkkaan. Ilmiötä kutsutaan hystereesiksi ja sen arvellaan johtuvan mm. siitä, että kostuvan aineen huokosiin loukkuun jäävä ilma ei pääse poistumaan huokosista riittävän nopeasti huokosten täyttyessä vedellä. Myös huokosten muodon arvellaan vaikuttavan kuivumisen ja kastumisen väliseen eroon tasapainokosteuskäyrässä. (Leivo ja Rantala 2002 julkaisu 120 s.14)

3 MAANVASTAINEN BETONIALAPOHJA

3.1 Alapohjan lämpöolosuhteet

Maanvastaisen alapohjarakenteen eri rakennekerrosten lämpötiloihin vaikuttavat erityisesti

- ulkoilman lämpötila
- sisäilman lämpötila
- rakennuksen lämpöhäviö alapohjarakenteen läpi (rakennekerrosten lämmönjohtavuus)
- mahdolliset lisälämmönlähteet kuten lattialämmitys
- maahan varastoituneen lämpösäteilyn määrä (Siikanen 2014, s. 28).

Ulkoilman lämpötilan vaihtelut vaikuttavat alapohjarakenteen lämpöolosuhteisiin, tosin vaikutus on huomattavasti hitaampaa, kuin vaihteluiden vaikutus rakenteisiin, jotka rajoittuvat ulkoilmaan (esimerkiksi ulkoseinät). Ulkoilmassa vuorokauden aikana tapahtuvat lämpötilavaihtelut ulottuvat yleensä syvimmillään noin 500 mm maanpinnan alapuolelle. Talvella, maan ollessa lumen peitossa, eivät lämpötilavaihtelut ulotu näinkään syvälle, lumen lämmöneristyskyvystä johtuen. (Siikanen 2014, s. 28) Syvemmillä maanpinnan alapuolella maan lämpötila on lähes vakio ympäri vuoden. Noin 14 – 16 metrin syvyydessä maan lämpötila on sama kuin maanpinnan lämpötilan vuotuinen keskiarvo. (GTK 2017a) Mitä syvemmillä maanpinnasta alapohjarakenne sijaitsee, sitä vähemmän ulkoilman vuodenaikojen mukaan vaihtuvat lämpötilat vaikuttavat alapohjan lämpöolosuhteisiin. Tyypillistä on, että lämpötilavaihtelut ovat suurempia lattian reuna-alueilla kuin lattian keskellä. Erityisen pientä lämpötilan vaihtelut ovat kellarin lattioissa sekä isojen rakennusten keskialueilla, joista matka ulkoilmaan on pitkä. (RIL 255, s. 151)

Alapohjan pintakerrosten lämpötila asettuu ajansaatossa yleensä lähelle sisäilman lämpötilaa, mutta se kuinka paljon sisäilman lämpötila vaikuttaa alapohjan alempien kerrosten, kuten maakerroksen lämpötilaan, riippuu rakenteen läpi maahan karkaavan lämpövirran suuruudesta. Lämpövirran suuruuteen vaikuttaa erityisesti lämmöneristekerroksen lämmönvastus. (RIL 255, s. 151) Lämmöneristekerroksen lämmönvastuksen lisäksi, myös maalajien lämmönjohtavuudella on merkitystä alapohjan alapuolisiin lämpöolosuhteisiin. Ilma johtaa lämpöä huonommin kuin vesi, mistä johtuen, on kostean maan lämmönjohtavuus parempi kuin esimerkiksi ilmapitoisen kuohkean täytemaan. Parhaiten lämpöä johtaa kallio ja huonoiten turvemaa. (Siikanen 2014, s. 28)

Lämpötila, perinteisen 10 – 50 vuotta vanhan lämmöneristetyn alapohjarakenteen alla olevassa maakerroksessa, on tutkimusten mukaan yleensä vähintään 12 °C. Lämmöneristämättömissä rakenteissa lämpötila on yleensä vähintään 15 – 16 °C. Kuitenkin niin lämmöneristetyissä, kuin erityisesti lämmöneristämättömissä rakenteissa, lämpötila maakerroksessa saattaa nousta jopa yli 20 asteeseen. Lattialämmitys ja maakerrokseen asennetut lämpöputket nostavat maan lämpötilan usein jopa korkeammaksi kuin sisäilman lämpötila. (RIL 255, s. 151) Lattialämmitettyjen alapohjalaattojen lämpötila on normaalisti noin 25 – 30 °C, jolloin myös täyttökerroksen lämpötila on yleensä korkea. (Leivo ja Rantala 2000, julkaisu 106, s. 78; Leivo ja Rantala 2006, s. 10)

Uudessa rakennuksessa maakerroksen lämpötila on yleensä alhaisempi, koska alapohjarakenteen läpi menevä lämpövirta ei vielä ole ehtinyt lämmittämään maakerrosta. Uudessa rakennuksessa laatan alapuolisen täyttökerroksen lämpötila on rakentamisen ajankohdasta riippuen yleensä noin 5 – 16 °C. (Leivo ja Rantala 2006, s. 10) Maan lämpötila alapohjarakenteen alla nousee tavallisesti noin vuoden käytön jälkeen lähelle vakiolämpötilaa. (RIL 255, s. 151)

3.2 Alapohjan kosteusolosuhteet

Maanvastaisen alapohjarakenteen eri rakennekerrosten kosteuspitoisuuteen vaikuttavat erityisesti

- mahdolliset vesivuodot
- rakennuksen käytöstä aiheutuva kosteus
- sisäilman kosteuspitoisuus
- rakentamisen aikainen kosteus (rakennekosteus)
- maaperän kosteuspitoisuus.

Vesivuotoja voi aiheutua esimerkiksi käyttöikänsä päähän tulleista, hajonneista lattialämmitys- tai käyttövesi-/viemäriputkista. Vuotovesiä lattialle voi päätyä myös vaurioituneen vedeneristeen läpi esimerkiksi katolta tai märkätiloista. Vesivuodot voivat aiheuttaa suuria kosteuspitoisuuksia rakenteisiin ja niiden havaitseminen saattaa kestää kauan. (RIL 250, s. 69) Rakennuksen käytöstä aiheutuvalla kosteudella tarkoitetaan esimerkiksi siivousvesien tai suihkussa käynnin rakenteille aiheuttavaa kosteuskuormaa.

Sisäilman kosteus

Rakennuksen sisäilman kosteuspitoisuus vaikuttaa erityisesti alapohjarakenteen ylimpien kerrosten kosteuspitoisuuteen. Rakennuksen sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttavat muun muassa

- ulkoilman kosteuspitoisuus
- rakennuksen käyttötarkoituksesta aiheutuva kosteuslisä
- sisällä kehittyvän kosteuden määrä
- ilmanvaihdon suuruus
- rakennus- ja sisustusmateriaalien kyky sitoa kosteutta itseensä tai luovuttaa sitä ympäristöön
- rakenteiden läpi poistuva kosteus
- rakennusmateriaalien (esim. betonin) sisältämän kosteuden kuivuminen sisäilmaan. (Leivo ja Rantala 2002, julkaisu 120, s. 8)

Suurin vaikutus sisäilman kosteuspitoisuuteen on ulkoilman kosteuspitoisuudella sekä rakennuksen sisällä tehtävistä toiminnoista ja rakennuksen käyttötarkoituksesta aiheutuvalla kosteuslisällä. Korkeimmillaan sisäilman suhteellinen kosteus on kesäaikaan, jolloin ulkoa siirtyy lämmintä ja kosteaa ilmaa ilmanvaihdon sekä ilmapuotojen seurauksena sisätiloihin. Matalimpia suhteellisen kosteuden arvoja puolestaan mitataan talven kovilla pakkasilla. Vaikka pakkasilla ulkoilman suhteellinen kosteus on todella korkea (90 – 100 %), ilman sisältämän vesihöyryn määrä (g/m^3) on pieni. (Ilmatieteen laitos 2017) Kun kylmä ja vesihöyrymäärältään alhainen ulkoilma siirtyy rakennuksen sisälle ja lämpiää, sen suhteellinen kosteus laskee.

Rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa voidaan ulkoilman kosteuspitoisuutena käyttää reaaliaikaisesti mitattua dataa tai olemassa olevaa tilastoitua dataa. Ilmatieteen laitos ja TTY ovat yhdessä määrittäneet vuosien 1980 – 2009 välisenä aikana kerättyjen toteutuneiden säähavaintojen pohjalta testivuodet kuvaamaan kosteusrasitusten osalta olosuhdevaihtelujen ääripäätä. Rakenteiden kosteustekniseen toimintaan liittyvien tarkastelujen avuksi on määritelty kaksi rakennusfysiikan ilmastollista testivuotta, Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007. Valittujen testivuosien pohjalta on luotu tulevaisuuden olosuhteita vastaavat testivuodet vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastolle. Vantaan testivuotta käytetään mitoittavana vuotena, jos rakenteen kosteustekniseen toimintaan vaikuttaa ulkoilman suhteellisen kosteuden lisäksi merkittävästi sade. Kun tarkasteltavan rakenteen toimintaan vaikuttaa pääasiassa ulkoilman suhteellinen kosteus, käytetään mitoittava vuotena Jokioisen testivuotta. Testivuodet ovat saatavissa Ilmatieteen laitoksen nettisivuilta. (Ilmatieteen laitos 2014; RIL 255, s. 68)

Rakennuksen käyttö ja rakennuksessa tapahtuva toiminta tuottavat sisäilmaan lisäkosteutta, jonka takia sisäilman kosteuspitoisuus nousee usein korkeammaksi kuin ulkoilman kosteuspitoisuus. Sisäilman kosteuslisä kertoo, kuinka paljon enemmän sisäilmassa on vesihöyryä ulkoilmaan verrattuna. (RIL 107-2012, s. 23) Kosteuslisän määrä (g/m^3) on tavallisesti suurempi talvella kuin kesällä, koska talvella sisällä oleskellaan enemmän. Lisäksi talvella ovia ja ikkunoita pidetään vähemmän auki, jolloin kosteus ei poistu sisältä yhtä nopeasti. Rakennuksen käyttötarkoituksesta aiheutuvan kosteuslisän määrään vaikuttaa rakennuksessa tapahtuvat päivittäiset toimenpiteet kuten

- ruuanlaitto
- pyykinpesu/-kuivaus
- suihkussa/saunassa käynti.

Lisäksi ihmisten/eläinten hikoilusta ja hengityksestä sekä kasveista vapautuu lisäkosteutta sisäilmaan. (RIL 255, s. 70) Sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttaa myös mm. huonekalujen ja huoneen pintojen materiaalivalinnat. Esimerkiksi massiiviset puuhuonekalut sitovat kosteutta itseensä. Sisäilman kosteuspitoisuutena voidaan käyttää

- vakioarvoa, jos suhteellinen kosteus pystytään pitämään vakiona esim. ilmastoinnin avulla
- suhteellisen kosteuden seurantamittauksilla saatua mittausdataa
- ulkoilman kosteuspitoisuutta, johon on lisätty sisäilman kosteuslisä. (SFS-EN ISO 13788)

Kansainvälisessä standardissa SFS-EN ISO 13788 on annettu eri ohjearvoja sisäilman kosteuslisälle ulkoilman lämpötilan sekä rakennuksen käyttötarkoituksen perusteella. Tutkimusten perusteella Suomessa on kuitenkin suositeltavaa käyttää *Taulukko 2* annettuja kosteusluokkia sekä *Kuva 13* annettuja kosteuslisän mitoitusarvoja. Rakennusaikana sisäilman kosteuslisä voi olla huomattavasti alla annettuja arvoja korkeampi, johtuen mm. betonivalujen kuivumisesta. (RIL 107-2012, s. 23)

Taulukko 2 Rakennustyyppien mukaan Suomen olosuhteisiin sopivat kosteusluokat ja niiden mukaiset kosteuslisan mitoitusarvot (RIL 107-2012, s. 24).

Kosteusluokka	Kosteuslisan mitoitusarvo talvella ($T \leq 5^\circ\text{C}$)	Rakennustyyppi ^{3,4}
1	$> 5 \text{ g/m}^3$ ¹	Kylpylät, uimahallit, laitoskeittiöt, pesulat, panimot, kirjapainot, kasvihuoneet, kostutetut tilat, ratsastusmaneesit, maatalouden tuotantorakennukset, eläinsuojat, teollisuuden kosteusrasitetut tilat
2	5 g/m^3	Asuinrakennukset, toimisto- ja liikerakennukset, hotellit ja majoitusrakennukset, ravintolat, kokoontumis- ja juhlatilat, opetusrakennukset ja päiväkodit, sairaalat ja hoitolaitokset, museot, liikuntahallit ja -tilat, jäähallit ja jäähdytetyt liikuntatilat ^{5,6} , kylmä- ja pakkashuoneet ^{5,6} , talviasuttavat vapaa-ajan asunnot
3	3 g/m^3 ²	Vapaa-ajan asunnot, puolilämpimät tai kylmillään olevat rakennukset, varastot ja säilytystilat, ajoneuvosuojat, tekniset tilat, väliaikaiset ja siirrettävät rakennukset

¹ Kosteusluokan 1 rakennuskohteissa sisäilman kosteuslisa ja lämpötila on aina arvioitava kohdekohtaisesti erikseen mitoituksen yhteydessä. Kosteuslisa voi vaihdella rakennuksen käyttötarkoituksesta riippuen välillä $6\text{--}20 \text{ g/m}^3$.

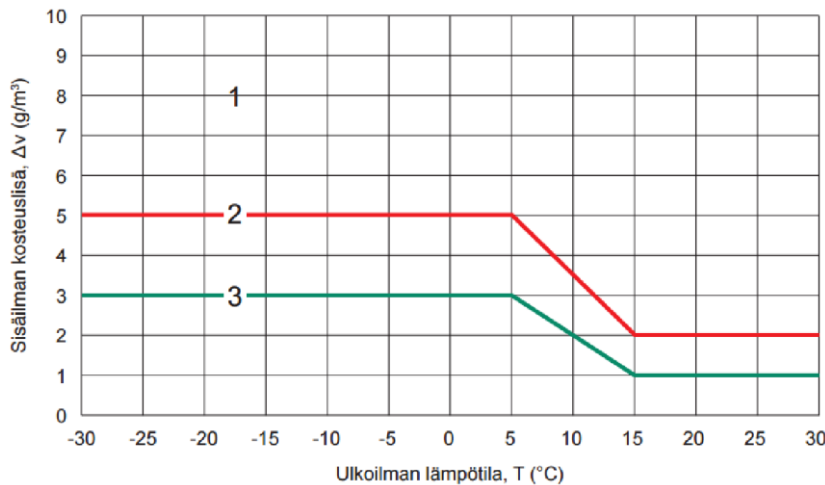
² Kosteusluokan 3 rakennuskohteissa kosteustekninen mitoitus tehdään käyttäen talvella kosteuslisan arvoa 3 g/m^3 , ellei voida luotettavasti osoittaa, että pienempikin kosteuslisa riittää tarkasteltavassa kohteessa.

³ Eri rakennustyyppisiin kuuluvia rakennuksia on lueteltu tarkemmin RakMK D3:ssa (2012).

⁴ Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa huomioon, että rakennuksen käyttötarkoitusta saatetaan joskus myöhemmin muuttaa, jolloin myös sen kosteusluokka voi muuttua.

⁵ Jäähdytettävien tilojen kosteusluokkaa valittaessa on otettava huomioon, että sisäilman kosteuslisa voi nousta suureksi sisätilan mahdollisten lämpötilamuutosten yhteydessä. Jäähallit ja muut jäähdytetyt liikuntatilat, joiden lämpötila nostetaan ajoittain korkeaksi ja joita käytetään ajoittain kosteusluokan 1 mukaisissa tarkoituksissa, kuuluvat kosteusluokkaan 1.

⁶ Jäähdytettävien tilojen vaipparakenteiden mitoituksessa on otettava huomioon myös ulkoa sisälle päin siirtyvä vesihöyry, joka voi aiheuttaa kosteuden kondensoitumista ja homeen kasvulle otollisia olosuhteita lähellä rakenteen sisäpintaa.



Kuva 13 Tutkimusten perusteella Suomeen sopivat eri kosteusluokkien sisäilman kosteuslisan mitoitusarvot ulkoilman lämpötilan funktiona (RIL 107-2012, s. 24).

Sisäilman kosteuslisa voidaan myös laskea yhtälöllä (Leivo ja Rantala 2002, julkaisu 120 s. 8)

$$\Delta v = \frac{G}{n \times V}, \quad (40)$$

jossa

G on kosteuden tuotto sisätiloissa, g/h

n on ilmanvaihtuvuus, $1/\text{h}$

V on tarkasteltavan huoneen tilavuus, m^3 .

Kosteuden tuotolle sisätiloissa (*G*) voidaan käyttää *Taulukko 3* annettuja arvoja.

Taulukko 3 Kosteuden tuotto asuinrakennuksen sisätiloissa (RIL 107-2000).

Kosteuslähde	Kosteustuotto
Ihminen	40...300 g/h riippuen aktiviteetista (keskimäärin 90 g/h)
Kylpy	700 g/h
Suihku	2600 g/h
Keittiötoiminta	600...1500 g/h (päivittäinen keskiarvo noin 100 g/h)
Avoin vesipinta	40 g/m ² h
Kasvit	
- Pienet kasvit	7...15 g/h
- Keskikokoiset	10...20 g/h
Vaatteiden pesu ja kuivaus	
- Lingottu pyykki	10...50 g/h /kg kuivaa pyykkiä
- vettä tippuva	20...100 g/h /kg kuivaa pyykkiä

Maaperän kosteus

Maaperän kosteus on yksi alapohjarakenteen merkittävimmistä kosteuslähteistä. Maaperän suhteellisen kosteuden alapohjalaatan alla voidaan olettaa olevan 100 %, mikä tarkoittaa, että lämpötilan noustessa, myös kosteuspitoisuus maassa kasvaa. (SFS-EN ISO 13788) Sadan prosentin suhteellinen kosteus vastaa maa-aineksen noin 0,5 – 1,0 painoprosentin vesipitoisuutta. Vesipitoisuus ei ole korkea, mutta mikäli maakerrokseen pääsee lisäksi nousemaan kosteutta kapillaarisesti vapaan veden pinnassa, nousee vesipitoisuus huomattavasti. Kapillaarisesti kyllästyneen maakerroksen vesipitoisuus liikkuu normaalisti välillä 10 – 20 painoprosenttia. (Leivo ja Rantala 2006, s. 10)

Alapohjarakenteen alapuolisen maakerroksen kosteuspitoisuuteen vaikuttavat mm.

- pohjaveden pinnan korkeus
- painovoimaisesti maanpinnalta alaspäin valuvan vajoveden määrä (erityisesti alapohjan reuna-alueilla)
- virheellisesti suunniteltu tai tukkeutunut maapohjan kuivatusjärjestelmä/salaojitus
- vapaan veden pinnasta kapillaarisesti ylöspäin nousevan veden määrä
- maalajien kapillaariset ominaisuudet. (RIL 255, s. 151; RIL 250, s. 64)

Pohjavesi on maanpinnan alapuolella sijaitsevaa vettä, ja sen pinnan korkeus on Suomessa yleensä 1 – 4 metrin syvyydellä maanpinnasta. Korkeimmillaan pohjaveden pinta on yleensä keväällä, kun lumet ja routa ovat sulaneet. (GTK 2017b)

Painovoimaisesti maanpinnalta alaspäin valuvan veden määrään vaikuttaa erityisesti maanpinnan kallistukset. Veden valuessa rakennukseen päin, myös alapohjan kosteuskuorma suurenee. Se, kuinka paljon tästä aiheutuu kosteusrasitusta alapohjarakenteelle, riippuu suuresti maanpohjan kuivatusjärjestelmien, kuten salaojien, toimivuudesta. Lisäksi merkitystä on esimerkiksi sokkelin/maanvastaisen seinän ulkopuolisen vedeneristeen kunnolla sekä sokkelin vierustan maataytön maa-aineksen rakeisuudella. Myös alapohjan alapuolisen pohjamaan kallistuksella on merkitystä alapohjan alapuolisen maakerroksen kosteuspitoisuuteen.

Rakentamisen aikainen kosteus

Rakentamisen aikaisella kosteudella tarkoitetaan kosteutta, joka on rakenteissa jo ennen rakennuksen käyttöönottoa (Hens 2016, s. 208). Rakentamisen aikana rakenteet voivat kastua mm. puutteellisesta sääsuojauksesta johtuen tai työmaalla tapahtuneen vesivahingon seurauksena. Kosteutta voi päästä rakenteisiin myös kuljetuksen ja varastoinnin aikana. Rakentamisen aikaiseen kosteuteen voidaan lukea myös lisäkosteus, joka tulee alapohjarakenteelle sen päällystämiseen käytettyiden tasoitteiden tai liimojen seurauksena. Räsänen et al. (1998) mukaan paksu tasoitekerros kostuttaa betonirakennetta huomattavasti pidempään kuin ohut tasoitekerros, mutta tasoitekerroksella on kasteleva vaikutus vain betonilaatan pintaosiin.

Rakennekosteutta on esimerkiksi materiaalin valmistusprosessin vaatima vesi. Erityisesti betonisilla alapohjarakenteilla rakennekosteus on merkittävä kosteuden lähde. Betonissa tapahtuva veden ja sementin välinen kovettumisreaktio vaatii vettä onnistuakseen, mutta betoniin joudutaan usein lisäämään vettä myös betonimassan työstettävyyden lisäämiseksi. Tätä ”ylimääräistä” vettä kutsutaan betonin rakennekosteudeksi, ja sen on ainakin osittain annettava kuivua ennen betonirakenteen päällystämistä.

Rakentamisen aikainen kosteus on otettava huomioon erityisesti betonirakennetta päällystettäessä. Betonirakenteen rakennekosteuden poistumiseen vaikuttaa mm. rakenteen paksuus, rakennetyyppi, betonin laatu sekä päällystemateriaalin kosteuden läpäisevyys.

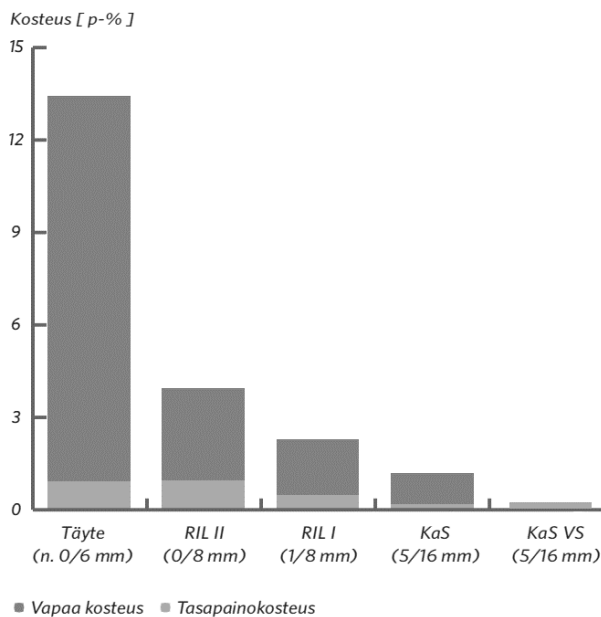
3.3 Alapohjan lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen

Uudessa rakennuksessa, jossa maakerroksen lämpötila on selvästi alempi kuin sisäilman lämpötila, on vesihöyryn osapaine maan huokosissa pienempi kuin sisäilmassa, jolloin diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran suunta on sisältä maata kohti. Kun maakerroksen lämpötila ajan myötä nousee lähemmäksi sisäilman lämpötilaa, maan huokosissa olevan vesihöyryn osapaine kasvaa ja diffuusiolla siirtyvän kosteusvirran suuntaa kääntyy maasta sisälle päin. Tällöin ylöspäin nouseva vesihöyry pyrkii kastelemaan rakennetta. Lattialämmitys tai esimerkiksi lattian alla kulkevat lämpöputket yleensä korostavat kyseistä ilmiötä. Lattialämmityksen lämmittämän maaperän huokosilmassa oleva korkea vesihöyryn osapaine kasvattaa kosteusgradienttia maan ja sisäilman välillä. Lämmityskaudella tämä ei ole ongelma, koska laatta on myös lämmin. Kesän tullessa (lämmitys laitetaan pois päältä) laatan lämpötila laskee nopeammin kuin laatan alla olevan maakerroksen lämpötila, jolloin kosteusvirran määrä sisäänpäin suurenee. Laatan ja sen alapuolisten kerrosten vesihöyrynvastuksien suuruuksista riippuu, kuinka paljon laatta ehtii kastua ennen seuraavan lämmityskauden alkua. Lämmityksen kytkeminen takaisin päälle höyrystää betonin huokosissa olevan adsorptioveden, jolloin vesihöyryn osapaine huokosissa nousee, kosteusvirran suunta kääntyy ja laatta alkaa kuivua. (RIL 255, s. 155 – 157)

Vesihöyryn diffuusiolla rakenteeseen pääsevän kosteuden määrä on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin kapillaari-imulla rakenteeseen pääsevän kosteuden määrä. Kapillaarisesti rakenteeseen siirtyvän kosteuden kannalta merkittäviä tekijöitä ovat

- rakenteen alapuolisen maakerroksen rakeisuus
- rakenteen alapuolisen lämmöneristeen kapillaarisuus
- rakenteen alapuolinen höyrynsulkukerros (esim. muovi)
- alapohjan betonilaatan ominaisuudet.

Kapillaarisesti siirtyvän kosteuden määrään maa-aineksessa vaikuttaa pääasiassa maa-aineksen rakeisuus. Yleisenä nyrkkisääntönä voidaan pitää, että mitä hienorakeisempaa maa-aines on, sitä korkeammalle vesi kapillaarisesti nousee. (Rudus 2017b) Kosteutta siirtyy myös karkearakeisen maa-aineksen pinnoilla olevan, hienoaineesta (raekoko alle 0,063 mm) koostuvan, pölykerroksen välityksellä. Maa-aineksen vesiseulomisella pystytään poistamaan pinnoille kertynyt hienoaines minimaalisen nousukorkeuden saavuttamiseksi. *Kuva 14* on esitetty eri kivituotteiden sisältämiä vesimääriä 200 mm korkeudella vapaan veden pinnasta. Kuvassa *Täyte* on hienoa hiekkaa, *RIL I* ja *RIL II* ovat salaojasoria, *KaS* ja *KaS VS* ovat kapillaarikatko sepeleitä, joista *KaS VS* on vesiseulottu hienoaineen poistamiseksi. (Rudus 2017b) Oikein valitulla ja vesiseulotulla tuotteella voidaan päästä alle 200 mm kapillaarikerrospaksuuksiin.



Kuva 14 Eri kivituotteiden sisältämiä vesimääriä 200 mm korkeudella vapaan veden pinnasta (Rudus 2017b).

Laatan alapuolinen lämmöneriste toimii usein myös kapillaarikatkona rakenteessa. Esimerkiksi solumuovieristeiden väitetään estävän tehokkaasti kapillaarisen kosteuden nouseminen rakenteeseen. Myös eristekerroksen vesihöyrynvastuksella on suuri merkitys rakenteen kosteusteknisen toiminnan kannalta. XPS- ja PU-eristeiden vesihöyrynvastus on suuri, jolloin betonin rakennekosteus pääsee kuivumaan lähes yksinomaan ylöspäin. Toisaalta maaperästä ylöspäin nousevan, rakennetta kastelevan, vesihöyryn määrä pienenee myös. EPS-eriste (vesihöyrynvastus pienempi) puolestaan mahdollistaa rakennekosteuden kuivumisen myös alaspäin, joskin hidastaa sitä merkittävästi, mutta samalla sallii vesihöyryn pääsemisen maaperästä rakenteeseen. (RIL 255, s. 154)

Laatan alapuolelle sijoitettu höyrynsulkukerros, kuten polyeteenikalvo tai kattohuopa, vähentää sekä vesihöyryn että kapillaarisen kosteuden siirtymistä maaperästä alapohjarakenteeseen. Brewerin (1965) laboratorio-olosuhteissa tekemien tutkimusten mukaan muovikalvon ja maaperän väliin kertyi kuitenkin huomattavia määriä vapaata vettä. Kattohuovan tapauksessa veden kertyminen oli maltillisempaa, mutta kattohuovan havaittiin hajoavan ja homehtuvan jo noin vuoden kestäneiden kokeiden päätteeksi. Tutkimuksessa huomattiin myös, että laatan päällystäminen tiiviillä päällysteellä nostaa laatan kosteuspitoisuutta, myös laatan alapuolisen höyrynsulkukerroksen tapauksessa. Kenttäolosuhteissa vettä saattaa tiivistyä myös laatan alla olevan höyrynsulkukerroksen päälle erityisesti, jos kosteusvirran

suunta on sisäilmasta maata kohti ja maaperä on riittävän viileä. Kosteutta saattaa kertyä höyrynsulun ja laatan väliin myös, betonin sisältämän rakennekosteuden tiivistyessä höyrynsulun yläpintaan. Höyrynsulku hidastaa lisäksi rakennekosteuden tai vesivuodon seurauksena rakenteeseen päässeän kosteuden kuivumista.

Kosteuden siirtymiseen betonisessa alapohjalaatassa vaikuttaa betonin ominaisuudet, kuten kapillaarihuokosten määrä. Betonin ominaisuuksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.1 *Betoni*.

3.4 Kosteuden aiheuttamat ongelmat betonisessa alapohjarakenteessa

Betonisen alapohjarakenteen kosteusongelmat ovat yleensä seurausta virheellisestä suunnittelusta tai virheistä rakentamisen aikana. Kosteuden aiheuttamia ongelmia saattaa aiheutua, jos

- betonilaatta päällystetään liian märkänä
- betonilaatta päällystetään liian tiiviillä päällysteellä
- käytettävät materiaalit vaurioituvat herkästi kosteuden seurauksena
- ympäröivät rakenteet on suunniteltu virheellisesti (esim. salaojien tai kapillaarikatkokerroksen puuttuminen)
- rakenteen yläpuolisen tilan käyttötarkoitus on valittu virheellisesti.

Betoninrakenteen kastuminen ulkoisen kosteuslähteen (esim. maaperä), vesivahingon tai rakennekosteuden seurauksena saattaa aiheuttaa ongelmia, ei niinkään betonille itselleen, vaan erityisesti betonin kanssa kosketuksissa oleville muille, huonommin kosteutta sietäville materiaaleille.

Päällysteiden VOC-emissiot

Alapohjarakenteen kosteusvaurio saattaa ilmetä esimerkiksi rakenteen pintakerrosten hajoessa kemiallisesti. Kemiallisen hajoamisen seurauksena pintakerroksista saattaa haihtua orgaanisia yhdisteitä sisäilmaan. Erilaisia orgaanisia yhdisteitä tunnetaan jo yli 1000 kappaletta, joista sisäilmassa on havaittu useita satoja. Yhdisteet jaetaan WHO:n mukaan neljään eri ryhmään, niiden kiehumispisteiden mukaisesti (*Taulukko 4*). Eniten tutkimuksen kohteena ovat olleet haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), joilla kiehumispiste on välillä 50 – 260 °C. Sisäilmassa VOC:it ovat pääasiassa kaasumaisessa tai höyrymäisessä muodossa, kun puolestaan heikommin haihtuvat yhdisteet (SVOC) voivat olla hiukkasmuodossa tai toisiin hiukkasiin kiinnittyneinä. (Rundt 2005; Hens 2016)

Taulukko 4 Orgaaniset yhdisteet kiehumispisteen mukaan (Rundt 2005).

Ryhmä	Selitys	Kiehumispiste
VVOC	erittäin haihtuvat yhdisteet	0 – 100 °C
VOC	haihtuvat yhdisteet	50 – 260 °C
SVOC	puoli haihtuvat yhdisteet	240 – 400 °C
POM	partikkeleihin sidotut yhdisteet	> 380 °C

Materiaalin kemiallisen hajoamisen seurauksena syntyvät emissiot voidaan havaita haju- ja/tai viihtyvyshaittoina sekä lukuisina eri terveyshaittoina. VOC:ien aiheuttamia terveyshaittoja on tutkimuksissa todettu olevan ainakin hengitysteiden ja silmien ärsytysoireet sekä astmaoireet. Joidenkin VOC-yhdisteiden epäillään myös aiheuttavan syöpää (Rundt 2005). Erityisesti 2-etyyliheksanoli, 1-butanoli ja fenoli on tutkimuksissa yhdistetty tiloihin, joissa oireita on koettu. (Tuomainen et al. 2003; Reiser et al. 2002) Puolihihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin kuuluvista ftalaateista osa on luokiteltu lisääntymisen kannalta vaaralliseksi. Lisääntymisvaaralliseksi luokiteltuja ftalaatteja ovat esimerkiksi

- bis(2-etyyliheksyyli)ftalaatti DEHP
- bentsyylibutyyliftalaatti BBP
- dibutyyliftalaatti DBP
- di-isobutyyliftalaatti DIBP. (Tukes 2013)

Ftalaateista esimerkiksi 2-etyyliheksyylin (DEHP) on huomattu aiheuttavan häiriöitä mm. normaalissa hormonitoiminnassa. Tämän hetkisen tutkimustiedon perusteella kaikki ftalaatit eivät kuitenkaan aiheuta lisääntymisvaaraa. Tällaisia ftalaatteja nykytiedon valossa ovat ainakin di-isononyyliftalaatti (DINP) ja di-isodekyyyliftalaatti (DIDP). (Tukes 2013)

Alapohjarakenteessa orgaanisten yhdisteiden pääasiallisia lähteitä ovat erilaiset päällystämateriaalit, erityisesti muovimatot ja linoleumi, sekä päällysteiden liimat ja lakat/maalit. Myös lattiatasotteet saattavat toimia päästölähteenä, mutta emissiotasot ovat tavallisesti pintamateriaaleja selvästi alhaisempia (Eronen et al. 1998). Liimoissa käytetään pehmeitä akrylaatteja tarraominaisuuden saavuttamiseksi. Yleisimpiä näistä ovat 2-etyyliheksyyliakrylaatti ja butyyliakrylaatti, joista voi kemiallisen hajoamisen seurauksena vapautua 2-etyyliheksanolia (2-EH) ja 1-butanolia sisäilmaan. Liimojen pehmitinpitoisuudet ovat kuitenkin muutaman prosentin luokkaa, kun taas PVC-muovimatoissa pehmittimien määrä voi olla yli 10 %. PVC-muovimatoissa pehmittimenä käytetyn 2-etyyliheksyylin (DEHP) on huomattu hajotessaan muodostavan 2-etyyliheksanolia. Korvaavana pehmittimenä käytetty di-isononyyliftalaatti (DINP) muodostaa hajotessaan ainakin iso-oktanolia, 6-metyyli-1-oktanolia ja 1-nonanolia. (Kiilto 2017a; b; Weber 2017) Tärkeää on huomata, ettei esimerkiksi liiman hajoamisen yhteydessä syntyvän 2-EH määrä välttämättä korreloi mitattuun 2-EH määrään sisäilmassa. Hajoamisessa syntyvät kaasut liikkuvat diffuusion avulla ja niiden pääsyyn sisäilmaan vaikuttaa mm. päällysteen tiiveys. Järnströmin (2007) mukaan esimerkiksi läpäisevämmät PVC-matot päästävät emissiota selvästi helpommin lävitseen kuin tiiviimmät matot. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 5) on esitetty eri orgaanisten yhdisteiden tavallisia päästölähteitä.

Orgaanisten yhdisteiden lisäksi sisäilmassa saatetaan havaita myös epäorgaania yhdisteitä, kuten ammoniakkia. Ammoniakkia huomattiin syntyvän mm. vanhojen itsestään tasoittuvien lattiatasotteiden sisältämän kaseiinin hajotessa. (Merikallio 2009)

Taulukko 5 Orgaanisten yhdisteiden tavallisia päästölähteitä (Rundt 2005).

Yhdisteet	Päästölähteitä
aldehydit: pentanaali, heksanaali, heptanaali, oktanaali, nonanaali	lattiavahat, linoleum
alifaattiset ja sykliset hiilivedyt: heksaani, heptaani, oktaani, sykloheksaani, metyyli sykloheksaani	liimat, liuottimet, polyuretaani
C4-C5-hiilivedyt: butaanit, pentaanit	polyuretaani
alkoholit: propanolit, butanolit, pentanolit	liuottimet, puhdistusaineet, maalit

aromaattiset hiilivedyt: etyylibentseeni, ksyleeni, trimetylibentseenit, tolueni	maalit, lakat, liimat, liuottimet, polyuretaani, puhdistusaineet
styreeni	polyesteri(lujitemuovi)hartsit, kumimatot
glykolit: 1-metoksi-2-propanoli, 1-etoksi-2-propanoli	vesiohenteiset maalit, lakat
1,2-propaanidoli, 2-(2-etoksietoksi)etanoli	korkkilaatat
klooratut hiilivedyt: tri- ja tetrakloorieteeni, 1,1,1-trikloorieteeni	liuottimet, kuivapesuaineet, liimat
siloksaanit : mm. dekametyylisyklopentasiloksaani	saumausaineet, kosteuseristeet, tekstiilien lian hyljintäpinnoitteet
terpeenit: alfa- ja beeta-pineeni, 3-kareeni, limoneeni	puumateriaalit, puhdistusaineet, maalit, liuottimet
TXIB, 2-etyyliheksanoli	muovimatot

Kosteusvauriosta johtuvan päällysteen/liiman hajoamisen yhteydessä puhutaan niin sanotuista sekundääriemissioista. Sekundääriemissioissa hajoaminen tapahtuu hydrolyysin seurauksena (Chino et al. 2009). Päällysteen/liiman hajoamisen ja sitä kautta syntyvien sekundääriemissioiden merkittävin aiheuttaja on betonin alkalisuus (pH 13 – 14) yhdistettynä betonin kosteuteen. Useissa eri kenttä- ja laboratoriotutkimuksissa (mm. Alexandersson 2004; Järnström 2005) on havaittu betonin kosteuspitoisuuden nousun lisäävän merkittävästi betonirakenteen liima- ja tasoitekerroksen VOC-emissioita. Toisaalta on myös havaittu betonin alkalisuuden vaikuttavan emissioihin merkittävästi, jopa tapauksissa, joissa betonin kosteus on ollut alhainen (Björk et al. 2003). Betonin suhteellinen kosteus vaikuttaa materiaaliemissioihin kuitenkin vasta korkeilla kosteuspitoisuuksilla. Esimerkiksi Wolkoff (1998) huomasi, ettei betonilattian suhteellisella kosteudella ole merkitystä mm. PVC-muovimaton VOC-emissioihin sen ollessa alle 50 %. Toisaalta Clausenin (2006 ja 2011) mukaan pelkkä suhteellisen kosteuden nouseminen ei kasvata esimerkiksi pehmittimenä käytettävän DEHP:n emissioita PVC-matosta, mutta pelkkä lämpötilan nouseminen kasvattaa emissioita selvästi.

Myös Van der Wal et al. (1997) huomasi lämpötilan nousun lisäävän PVC muovimattojen VOC-emissioita. Wolkoff (1998) puolestaan huomasi lämpötilan nousun lisäävän tiettyjen VOC-yhdisteiden emissioita tutkituissa näytteissä. PVC muovimatoilla lämpötilan nousu nosti tutkimuksen mukaan 2-etyyli-1-heksanolin sekä fenolin emissioita. Lattiavahoilla nousua tapahtui puolestaan butyyliasetaatin emissioissa. Tutkimusten mukaan lämpötilan vaikutus emissioiden kannalta on kuitenkin merkittävää vasta normaalia huoneilmaa selvästi korkeammassa lämpötiloissa.

Emissioiden haihtumisen määrää materiaalista sisäilmaan lisää myös ilmanvaihdon tehostaminen, mutta yhdisteiden määrään sisäilmassa sillä on vähentävä vaikutus (Lin et al. 2009).

Mikrobit

Alapohjarakenteen kosteusvaurio saattaa aiheuttaa myös mikrobikasvustoa rakenteessa. Mikrobikasvun alkaminen rakenteen pinnalla vaatii hieman happea, riittävän lämpötilan, hiiltä, typpeä, alustan suoloja sekä riittävästi kosteutta. Riittävästi happea, hiiltä, typpeä ja suoloja löytyy lähes kaikilta pinnoilta, joten mikrobikasvun kannalta kriittisiä tekijöitä ovat lämpötila ja kosteus. (Hens 2016) Kosteusvaurion aiheuttama mikrobikasvusto havaitaan yleensä alkuvaiheessa erilaisina viihtyisyys- ja hajuhaittoina. Myöhemmässä vaiheessa tiloissa oleskelevat saattavat saada erilaisia ärsytys- ja yleisoireita. Pitkään jatkunut altistuminen (10 – 15 v) saattaa aiheuttaa vakaviakin terveyshaittoja. Yleistä mikrobivaurioille ainakin altistumisen alkuvaiheessa on, että oireet häviävät vauriorakennuksesta poistuttaessa. (Putus 2014)

Mikrobeja on rakenteessa kuitenkin aina, joten on tärkeää erottaa, mitkä mikrobisuvut viittaavat kosteusvaurioon ja mitkä eivät. Eri mikrosuvut myös aiheuttavat erilaisia terveysriskejä: toiset allergisoivat, toiset erittävät myrkyllisiä toksineja ja toiset voivat aiheuttaa suoran infektion elimistössä. (Putus 2014) Eri mikrobisukujen välisiä terveyshaittoja on alettu tutkia vasta viime vuosina tosissaan, joten selkeää tietoa eri sukujen terveysvaikutuksista ei vielä ole saatavilla. Useiden eri tutkimusten perusteella on myös luotu lista niin sanotuista kosteusvaurioindikaattorimikrobeista (Taulukko 6), joiden esiintyminen yleensä viittaa kosteusvaurioon rakenteessa.

Taulukko 6 Lista kosteusvaurioindikaattorimikrobeista (Sisäilmayhdistys 2017).

Kosteusvaurioindikaattorit				
Absidia	Aspergillus versicolor	Eurotium	Phialophora	Stachybotrys
Acremonium	Aureobasidium	Fusarium	Phoma	Streptomyces
Aspergillus flavus	basidiomykeetit	Exophiala	Rhinocladia	Trichoderma
Aspergillus fumigatus	Botrytis	Geomyces	Rhizopus	Tritirachium
Aspergillus ochraceus	Chaetomium	Memnoniella	Rhodotorula	Ulocladium
Aspergillus penicillioides	Chrysionilia	Mucor	Scopulariopsis	Wallemia
Aspergillus sydowii	Chrysosporium	Oidiodendron	Sporobolomyces	
Aspergillus terreus	Engyodontium	Paecilomyces	Sphaeropsidales	

Eri materiaalit suosivat eri mikrobisukujen kasvua ja toisissa materiaaleissa mikrobit kasvavat huomattavasti helpommin kuin toisissa. Esimerkiksi alapohjarakenteen betonilaatta itsessään on huono kasvualusta mikrobeille, mutta betonin pinnalla olevassa liassa tai pölyssä mikrobeita saattaa kasvaa. Mikrobit vaativat kasvaakseen 5 – 40 °C lämpötilan, mutta optimaalisin lämpötila on 17 – 27 °C, joka alapohjan osalta usein täyttyy. (Hens 2016) Mikrobivaurion kannalta kriittinen suhteellinen kosteus riippuu materiaalin kosteudensietokyvystä ja homehtumisherkyydestä. Viitasen (2004) tutkimuksen mukaan puhtaan betonipinnan homekasvun rajakosteus (RH) huoneen lämpötilassa on välillä 88 – 90 %. Jos betonin pinnalla on orgaanista ainesta tai pölyä, rajakosteus laskee välille 78 – 80 %.

Betonisessa alapohjarakenteessa mikrobikasvusto syntyy useimmiten orgaanista ainesta sisältävään päällysteeseen. Herkkiä mikrobikasvustolle ovat erityisesti puupohjaiset päällysteet kuten laminaatit ja parketit. Päällysteissä on usein riittävästi ravinteita mikrobivaurion etenemistä varten, ja päällysteen lämpötila on suotuisa, niin tarvitaan enää riittävä kosteuspitoisuus, jotta mikrobikasvu voi alkaa. Kun puupohjainen päällyste on kostean betonilaatan päällä, pyrkivät materiaalit tasapainokosteuteen keskenään. Kosteasta betonista siirtyy kosteutta puuhun niin kauan, kunnes niiden huokosilman suhteellisen kosteus on sama. Betonin huokosilman suhteellisen kosteuden noustessa yli 70 %, hygroskooppisen tasapainokosteuden saavutettuaan, alkaa esimerkiksi parketin kosteuspitoisuus lähestyä 20 painoprosenttia, vaikka betonin kosteuspitoisuus saattaa olla alle 4 painoprosenttia (Ahlgren 1972, s. 164 – 175). Puun mikrobivaurioituminen alkaa, kun sen kosteuspitoisuus pysyttelee pitkiä aikoja yli 20 painoprosentissa, minkä johdosta kriittisenä suhteellisen kosteuden arvona puulle pidetään usein 70 – 75 %. (Puuinfo 2017a; Suomen Betonitieto Oy 2007, s. 16) Jos betonista puuhun siirtynyt kosteus ei pääse poistumaan päällysteestä, päällyste saattaa mikrobivaurioitua tai alkaa turvota. (Merikallio 2009, s. 18) Nielsen et al. (2004) toteaa, että suhteellisen kosteuden alarajana puupohjaisten ja tärkkelystä sisältävien rakennusmateriaalien homekasvulle voidaan pitää 78 % (T = 20 – 25 °C). Keraamiset materiaalit puolestaan vaativat yli 90

%:in RH:n homekasvun alkamiselle. Berryn (2002) tutkimus puolestaan painotti päällysteiden puhtauden tärkeyttä. Tutkimuksessa tutkittiin useiden eri päällysteiden homehtumisherkkyyttä puhtaina ja likaisina ($T = 27\text{ °C}$, $RH = 80\%$), ja huomattiin ainoastaan likaantuneiden päällysteiden homehtuvan näissä olosuhteissa.

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi yleisiä viitteitä maanvaraisen alapohjarakenteen kosteusvauriosta on lattiapäällysteen irtoilu, kupliminen (erityisesti epoksi- ja polyuretaanipinnoitteilla) tai värinmuutos. (Leivo ja Rantala 2006, s. 45)

3.5 Alapohjan kosteusvaurioiden ennaltaehkäisy

Alapohjarakennetta tai sen korjausta suunniteltaessa on välttämätöntä tuntee rakenteen lämpö- ja kosteustekninen käyttäytyminen sekä lämmön ja kosteuden siirtymismekanismit. Suunnittelijan tulee myös ymmärtää eri rakennekerrosten merkitys lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan kannalta, sekä tuntee eripuolilla rakennetta vaikuttavat lähtöarvot ja reunaehdot. Tärkeimpiä huomioitavia teknisiä seikkoja alapohjarakenteen kosteusvaurioiden ennaltaehkäisyyn kannalta ovat

- pihan ja rakennuspohjan kuivatus
- alapohjan sijainti maanpintaan nähden
- rakenteen alapuolinen kapillaarikatkerros
- rakennekosteuden riittävä kuivuminen ennen päällystystä
- päällysteen vesihöyryn läpäisevyys
- riittävä rakenteen alapuolinen lämmöneristekerros
- kosteutta kestävät tai kosteudelta suojaavat materiaalivalinnat

Pihan kuivatuksella tarkoitetaan piha-alueen vedenpoistoa, kuten hulevesien ohjausta rakennuksesta pois päin maan pinnan kallistusten avulla sekä katolta tulevien sadevesien johtamista pois sokkelin luota. Rakennuspohjan kuivatuksella tarkoitetaan puolestaan salaojajärjestelmiä sekä esimerkiksi alapohjan alapuolisen maakerroksen pinnan kallistuksia. Piha-alueet muotoillaan siten, että hulevedet valuvat rakennuksesta pois päin. Myös alapohjan alapuolinen pohjamaa muotoillaan siten, että se viettää alapohjan keskialueelta anturan vieressä olevia salaojia kohti. Näin ollen alapohjalaatan alle päässyt vesi pääsee valumaan sekä laatan että anturan alla olevaa jatkuvaa kapillaarikerrosta pitkin salaojiin. Salaojien yläpinta asennetaan anturan alapinnan alapuolelle ja salaojat ympäröidään kapillaarikerroksella. Myös sokkelin vierustan tulee olla kapillaarista maa-ainesta, jotta rakennuksen seinustoille päätyneet veden valuvat salaojiin. Lattiapinnan suositellaan olevan vähintään 300 mm maapintaa korkeammalla (pois lukien esim. kellarit). (RIL 250 s. 54)

Alapohjarakenteen toimivuuden kannalta kosteuden kapillaarinen siirtyminen rakenteeseen tulee estää kokonaan. Solumuovieristeet ja oikeaoppinen maa-aines laatan alla estävät tutkimusten mukaan tehokkaasti kapillaarisen kosteuden nousemista rakenteeseen. (RIL 255 s. 155) Kapillaarinen sorakerros vähentää myös vesihöyryllä maaperästä alapohjarakenteeseen siirtyvän kosteuden määrää noin 10 – 25 %. (Brewer 1965, s. 16) Kapillaarikatkona käytettävän maa-aineksen tulee sisältää niin vähän hienorakeista ainesta (raekoko 1 mm) kuin mahdollista. Kapillaarikatkon kerrospaksuuden tulee olla selvästi suurempi kuin aineksen mitatun kapillaarisen nousukorkeuden. (Leivo ja Rantala 2006, s. 10) Yleisenä ohjeena on,

että kapillaarikerroksen paksuus tulee olla vähintään 20 % suurempi kuin käytetyn maa-aineksen vedennousukorkeus ja yleensä vähintään 300 mm. (Rudus 2017a)

Rakennekosteuden kuivumisesta on huolehdittava ennen lattian päällystystä. Erityisesti jos rakenne päällystetään huonosti kosteutta kestävällä tai tiiviillä, vesihöyryä huonosti läpäisevällä päällysteellä tai rakenteen päälle asetetaan jotain muuta huonosti kosteutta kestävä materiaalia. Merikallio (2009) on koonnut eri lähteissä ilmoitettuja enimmäisarvoja betonin suhteelliselle kosteudelle mittaussyvyydellä alla olevaan taulukkoon (Taulukko 7). Taulukosta huomataan, että ilmoitetuissa arvoissa saattaa olla suuria heittoja lähteestä riippuen. Merikallio kiinnitti huomiota myös erikoiseen seikkaan, että tiiviillä muovipäällysteillä sallitaan korkeimmat suhteellisen kosteuden arvot, vaikka juuri niillä päällystettäessä kosteusongelmia ilmenee. Kirjallisuudessa annettujen enimmäisarvojen sokeaa noudattamista tärkeämpää on tuntee rakenteen lämpö- ja kosteustekninen toiminta, rakenteen eri kerrosten lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet sekä huomioida materiaalivalmistajan ohjeet. Alapohjarakenteilla ohjearvona voidaan pitää, että pintamateriaalien (esim. päällyste + liima) tulee läpäistä kosteutta nopeammin kuin kosteutta siirtyy maaperästä rakenteeseen.

Taulukko 7 Eri lähteistä poimittuja betonilaatan suhteellisen kosteuden maksimiarvoja mittaussyvyydeltä ennen päällystämistä (Merikallio 2009).

Alustabetonin suhteellisen kosteuden RH (%) enimmäisarvot päällystyshetkellä				
Päällystemateriaali	SisäRYL 2000	by45/BLY7 Betonilattiat 2002	by 47 Betoniraken- tamisen laatuohjeet 2007 ¹⁾	Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet (2007) ^{1) 2)}
Alustaan liimattava lautaparketti (ilman puun ja betonin välistä kosteudeneristystä)	60 %	85 %	-	85 % (normaalibe- toni) 90 % (v/s < 0,5)
Mosaikkiparketti	80 %	80 % (pinta < 75 %)	85 % 90 % (v/s < 0,5)	85 % 90 % (v/s < 0,5)
Kelluva lautaparketti (puun ja betonin välissä kosteudeneristys)	80 %	90 %	85 % 90 % (kost. kestävä tasoite tai ei tasoitetta)	85 %
Laminaatti (puun ja betonin välissä kosteudeneristys)	80 %	-	85 %	85 %
Huopa ja solumuovipoh- jaiset muovimatot	85 %	85 %	85 %	85 %
Muovimatot ilman huopa- tai solumuovipohjaa	90 %	90 %	85 %	85 %
Kumimatot	85 %	85 %	85 %	85 %
Linoleumi	90 %	90 %	85 %	85 %
Tekstiilimatot, joissa alusrakenne	85 %	85 %	85 %	85 %
Täyssynteettiset tekstii- limatot ilman alusraken- netta	90 %	90 %	90 %	90 %
Muovilaatat	90 %	90 %	90 %	90 %

Alapohjarakenne eristetään alapuolelta, jotta yläpuoliset rakenneosat saadaan pidettyä lämpiminä. Lämmöneristeen vesihöyrynvastuksen ja kapillaariominaisuuksien lisäksi, myös eristeen lämmönvastuksella on merkitystä alapohjan kosteusongelmien ehkäisyssä. Lämmöneristeen lämmönvastuksen tulee olla riittävän iso pitääkseen kosteusdiffuusion suunta sisäilmasta maahan päin. Toisin sanoen lämmöneristeellä pyritään pitämään riittävän suuri lämpötilaero sisäilman ja lämmöneristeen alapuolisen maakerroksen välillä, jottei maakerroksen huokosissa oleva vesihöyryn osapaine nouse sisäilman vesihöyryn osapainetta korkeammaksi.

Alapohjarakenteissa materiaalivalintoihin tulee kiinnittää erityistä huomiota. Valintojen tärkeys korostuu erityisesti vanhoissa tai virheellisissä rakenteissa, joissa on puutteellinen lämmöneriste-/kapillaarikatkokerros tai rakennuspohjan kuivatus ei ole kunnossa. Riittävän vesihöyryn läpäisevyyden lisäksi päällystemateriaalien tulee sietää ajoittain korkeitakin kosteuksia. Markkinoilla on myös ratkaisuja, joilla pyritään vähentämään kosteuden haittavaikutuksia pintamateriaaleissa. Tällaisia tuotteita ovat muun muassa ilmastoidut lattiat sekä matala-alkaliset tasoitteet.

4 ALAPOHJAMATERIAALIEN LÄMPÖ- JA KOSTEUS-TEKNISET OMINAISUUDET

Luvussa käsitellään tässä tutkimuksessa tarkasteltavan alapohjarakeen eri rakennekerrosten rakennusfysikaalisia ominaisuuksia. Luvussa keskitytään erityisesti rakenteen lämpö- ja kosteusteknisen käyttäytymisen kannalta merkittävimpiin ominaisuuksiin.

4.1 *Betoni*

Betonin koostumus

Betoni koostuu runkoaineesta, vedestä, sementistä sekä mahdollisista lisä- ja seosainesta. Vesi ja sementti muodostavat yhdessä sementtiliiman, joka kovettuu hydrataation seurauksena sementtikiveksi. Vettä tarvitaan hydrataation onnistumisen lisäksi myös betonimassan paremman työstettävyyden ja juoksevuuden aikaansaamiseen. (Suomen betoniyhdistys r.y. 2004) Betonin tämän työn kannalta merkittävimpiin lämpötekniisiin ominaisuuksiin vaikuttaa pääasiassa runkoaineen koostumus sekä sementtiliiman sisältävän veden määrä, kun taas kosteusteknisten ominaisuuksien kannalta merkittävimpiä on sementtikiven huokosrakenne.

Kovettuneeseen sementtiliimaan (sementtikivi) muodostuu hydrataation seurauksena pääasiassa kahdenlaisia huokosia: Geelihuokosia ja kapillaarihuokosia. Geelihuokokset ovat sementtigeelin sisältämiä, pieniä, halkaisijaltaan noin 1 – 3 nm kokoisia huokosia, joiden osuus sementtigeelin tilavuudesta on noin 25 – 30 %. Kapillaarihuokokset ovat sementin hydrataation seurauksena jäljelle jääneitä onkaloita, jotka eivät jostain syystä ole prosessin aikana täyttyneet hydrataatiotuotteista. Onnistuneen hydrataation seurauksena kapillaarihuokokset jäävät, alhaisen vesisementtisuhteen sementissä, noin 10 – 50 nm kokoisiksi, kun taas korkean v/s-suhteen sementissä saattaa huokosten halkaisija olla jopa 3 – 5 µm. Kapillaarihuokosia ei muodostu betoniin, jonka v/s-suhde on alle 0,38. (Neville 2011, s. 25; Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004; Mehta ja Monteiro 2014, s. 31)

Sementtiin muodostuu huokosia myös betonimassaa sekoittaessa sekä valun aikana. Nämä huokokset ovat huomattavasti geeli- ja kapillaarihuokosia isompia. Betonin työstön seurauksena syntyvät huokokset jaetaan usein kahteen ryhmään: tiivistyshuokosiin ja suojahuokosiin. Tiivistyshuokosia syntyy, kun ilmaa jää ”loukkuun” sementtipastan sisään, epätäydellisen tiivistyksen seurauksena. Tiivistyshuokosten halkaisija saattaa olla jopa 3 mm. Suojahuokosia puolestaan luodaan sementin sekaan tarkoituksella, eräiden lisäaineiden, kuten huokostimien avulla. Suojahuokosten koko on noin 50 – 200 µm. (Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004; Mehta ja Monteiro 2014, s. 31)

Kosteus betonissa

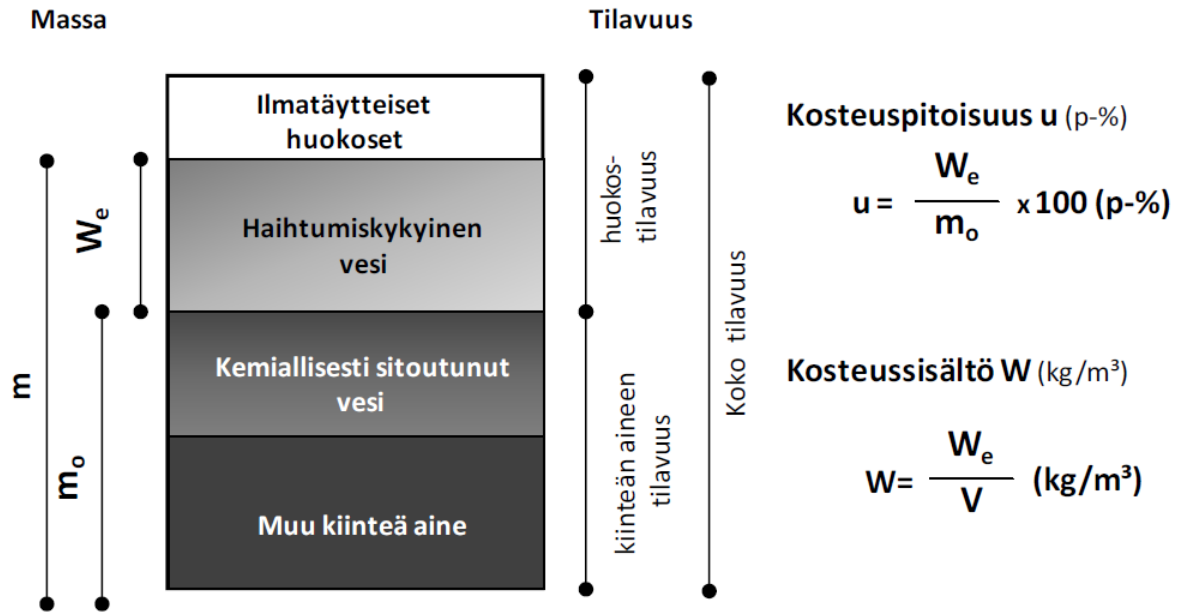
Kosteutta voi betonissa olla kolmessa eri olomuodossa: nesteinä, vesihöyrynä tai jäänä. Lämpimän rakennuksen alapohjarakenteen kohdalla voidaan olettaa, ettei jään muodostumista betonin sisälle synny, joten tässä luvussa keskitytään kosteuden olomuodoista nesteseen (veteen) ja vesihöyryyn.

Betonissa oleva kosteus voidaan jakaa eri kategorioihin riippuen tavasta, jolla kosteutta halutaan tarkastella. Eräs tapa on jakaa kosteus kahteen eri ryhmään kosteuden haihtumiskyvyn

perusteella. Tällöin kosteus jaetaan: Haihtumiskykyiseen ja haihtumiskyvyttömään kosteuteen. Kosteus voidaan jakaa myös kemiallisesti sitoutuneeseen tai fysikaalisesti sitoutuneeseen kosteuteen (*Kuva 15*). Fysikaalisesti sitoutuneella kosteudella tarkoitetaan kapillaarihuokosten seinämiin adsorboitunutta tai kapillaarihuokosissa kapillaarivoimien takia olevaa kosteutta. Kemiallisesti sitoutuneella kosteudella taas tarkoitetaan sementin hydrataation seurauksena geelihuokosiin sitoutunutta kosteutta. Fysikaalisesti sitoutunut kosteus on haihtumiskykyistä kosteutta, kun taas kemiallisesti sitoutunut vesi ei häviä betonin kuivumisen seurauksena, vaan se haihtuu betonista vasta noin 1000 °C lämpötilassa. Geelihuokosiin vahvojen vetysidosten avulla fysikaalisesti sitoutunut vesi poistuu betonista suhteellisen kosteuden laskiessa alle 11 %. Tämän jälkeen niin sanottu sementtigeelisyys myös kutistuu merkittävästi. (Mehta ja Monteiro 2014, s. 33; Ahlgren 1972, s. 19 – 23, 77)

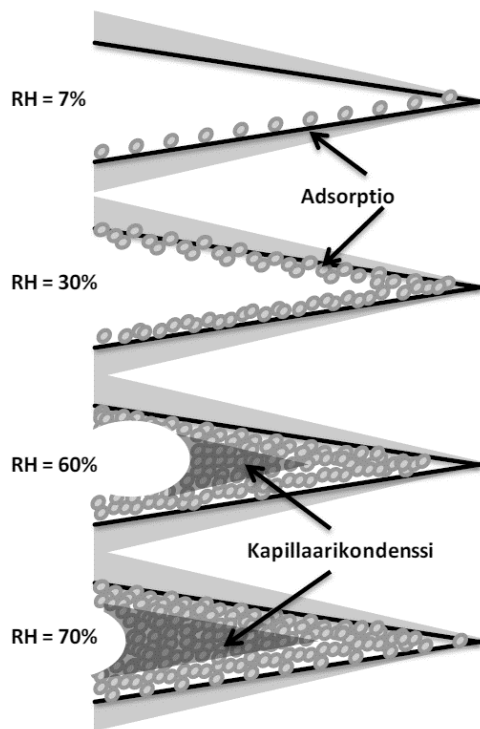
Kapillaarista vettä esiintyy vain huokosissa, joiden halkaisija on suurempi kuin 5 nm. Kapillaarisesti sementin huokosissa oleva vesi voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: Vapaaseen veteen, jota esiintyy huokosissa, joiden halkaisija on > 50 nm sekä veteen, jonka poistuminen aiheuttaa betonirakenteen kutistumista. Poistuessaan kutistumista aiheuttavaa vettä esiintyy huokosissa, joiden halkaisija on 5 – 50 nm. (Mehta ja Monteiro 2014, s. 33) Kapillaarihuokokset tyhjentyvät vedestä, kun ilmatilan suhteellinen kosteus laskee alle 45 %. (Neville 2011, s. 36)

Betonin kosteuspitoisuus voidaan ilmoittaa kosteuspitoisuutena painoprosentteina betonin kuiva-aineen massasta (u) tai kosteussisältönä betonin tilavuuden suhteen (W) (*Kuva 15*). Betonin suhteellisesta kosteudesta (RH) puhuttaessa, viitataan kapillaarihuokosten sisällä olevan ilman suhteelliseen kosteuteen. Toisin kuin kosteuspitoisuuteen, betonin suhteelliseen kosteuteen ei vaikuta kapillaarihuokosten seinämissä adsorboituneena eikä huokosissa kapillaaristen voimien vaikutuksessa olevan veden määrä. (Merikallio 2009, s. 15; Nilsson 1979, s. 12) Normaalisti lämpötilan noustessa suhteellinen kosteus pienenee, mutta betonilla ilmiö on usein päinvastainen. Huokosilman lämpötilan noustessa, huokosten seinämiin adsorptiolla kiinnittynyt vesi höyrystyy vesihöyryksi huokosilmaan, ja näin ollen huokosilman suhteellinen kosteus nousee. Vastaavasti lämpötilan laskiessa huokosten seinämiin kiinnittyvien vesimolekyylien määrä kasvaa, jolloin huokosilman suhteellinen kosteus laskee. (Nilsson et al. 2006, s. 9; Merikallio 2009, s. 16)



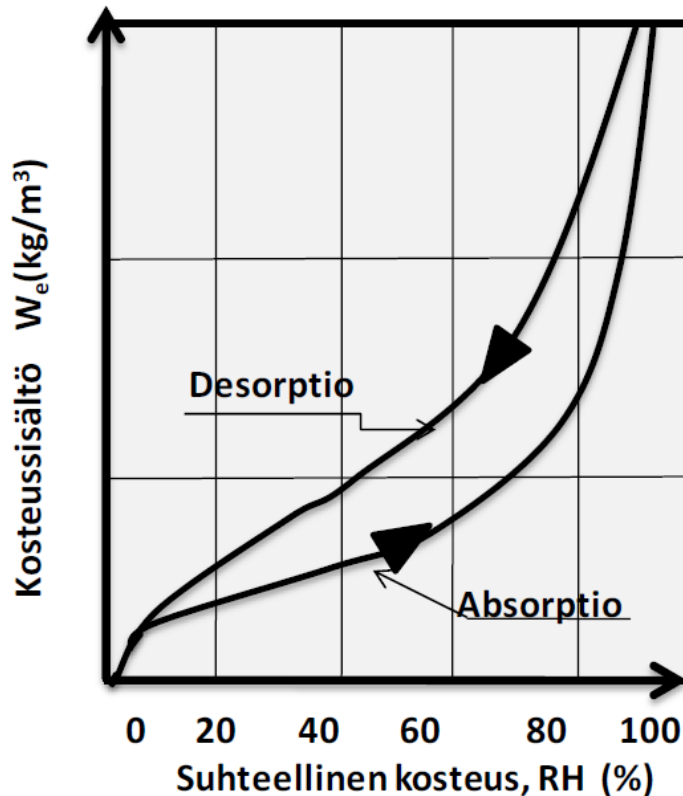
Kuva 15 Periaatekuva kosteuden jakautumisesta betonissa (Alkuperäinen lähde *Betonghandbok* 1997, s. 302, muokattuna lähteestä Merikallio 2009, s. 14).

Suhteellisen kosteuden ollessa alhainen, yksittäiset vesimolekyylit adsorboituvat betonin kapillaarihuokosten pinnoille ja kosteussisältö betonissa nousee nopeasti (*Kuva 16*). Tämän jälkeen keskisuurilla RH:n arvoilla vesimolekyyli-ryhmät adsorboituvat kapillaarihuokosten seinämiin ja kosteussisällön kasvaminen hidastuu. Suhteellisen kosteuden kohotessa riittävästi, kapillaarikondenssi nousee hallitsevaksi, milloin betonin kosteussisällön kasvu kiihtyy. (Ahlgren 1972, s.34)



Kuva 16 Huokosilman suhteellisen kosteuden (RH) noustessa, kapillaarihuokosten seinämiin adsorptiolla sitoutuneen kosteuden määrä kasvaa. RH:n noustessa riittävästi, huokosiin sitoutuu kosteutta myös kapillaarisesti. (Alkuperäinen lähde Ahlgren 1972, s.34, kuva muokattuna lähteestä Merikallio 2009, s. 13)

Betonin huokosilman suhteellisella kosteudella sekä kapillaarihuokosiin fysikaalisesti sitoutuneella kosteuspitoisuudella on yhteys, jota kutsutaan betonin tasapainokosteuskäyräksi tai sorptiokäyräksi (Kuva 17). Betonille sorptiokäyrä voidaan antaa joko kosteuspitoisuuden (p-%) tai kosteussisällön (kg/m^3) suhteen. Käyrän muoto riippuu siitä, onko betoni kuivumassa (desorptio) vai kastumassa (absorptio). Sorptiokäyrästä huomataan, että kuivuessaan märkä betoni sisältää samassa suhteellisessa kosteudessa enemmän kosteutta verrattuna kastuvaan betoniin. (Nilsson 1979, s. 14) Tätä hystereesiksi kutsuttua ilmiötä on käsitelty tarkemmin esimerkiksi Ahlgrenin (1972) kirjassa, eikä siihen perehdytä tarkemmin tässä tutkimuksessa. Sorptiokäyrä kuvaa materiaalin kosteuspitoisuutta vain hygroskooppisella alueella ($\text{RH} < 98 - 100 \%$). Kun suhteellinen kosteus nousee välille $98 - 100 \%$, betonissa olevat isoimmat huokokset alkavat osittain täyttyä vedestä ja betoni siirtyy kapillaariselle alueelle. (Nilsson at al. 2006, s. 9)



Kuva 17 Periaatekuva betonin tasapainokosteuskäyrästä (Alkuperäinen lähde Ahlgren 1972, s. 46, muokattuna lähteestä Merikallio 2009, s. 15)

Kemiallisesti geelihuokosiin sitoutunut vesi ei pysty liikkumaan huokosten sisällä, toisin kuin kapillaarihuokosiin fysikaalisesti sitoutunut vesi. Betonipinnoitteiden tms. kannalta ongelmia aiheuttaa juuri fysikaalisesti huokosiin sitoutunut, haihtumiskykyinen kosteus. Kun ympäröivän ilman RH laskee, fysikaalisesti sitoutunut vesi pyrkii poistumaan huokosista, ja näin ollen tasaamaan betonin ja ympäröivän ilman välille syntyvää kosteusgradienttia. Ympäröivän ilman RH:n noustessa, huokosten seinämiin sitoutuvan kosteuden määrä puolestaan nousee. Betoni siis pyrkii hygroskooppiseen tasapainotilaan ympäristönsä kanssa. (Merikallio 2009, s. 14)

Betonin lämpötekniset ominaisuudet

Tiiviin ja halkeilemattoman betonirakenteen läpi lämpöä siirtyy lähes yksinomaan johtumalla. Näin ollen tämän tutkimuksen kannalta tärkeimpiä betonin lämpötekniisiä ominaisuuksia ovat lämmönjohtavuus (λ_c) ja ominaislämpökapasiteetti (c_c). Betonin lämmönjohtavuudella on vaikutusta esimerkiksi lämpötiloihin eripuolella rakennetta sekä lämpötilavaihteluiden nopeuteen. Betonin lämmönjohtavuuteen vaikuttavat betonin rakenne, kosteuspitoisuus sekä jossain määrin myös betonin tiheys ja lämpötila. Rakenteellisesti merkittävin tekijä betonin lämmönjohtavuuden kannalta on runkoaineen mineraloginen koostumus. Mineeraaleista esimerkiksi Basaltilla on alhainen lämmönjohtavuus, kun puolestaan Kvartsiitti johtaa lämpöä huomattavasti paremmin. Myös betonin kosteuspitoisuudella on selkeä vaikutus betonin lämmönjohtavuuteen (Taulukko 8). Veden lämmönjohtavuus on korkeampi kuin ilman, ja näin ollen kostea betoni johtaa lämpöä paremmin kuin kuiva betoni. Toisaalta veden lämmönjohtavuus on alle puolet sementtikiven lämmönjohtavuudesta, mistä johtuen alhaisen v/s-suhteen betoneilla lämmönjohtavuus on suurempi kuin korkeiden v/s-suhteiden

betoneilla. Nevillen (2011) mukaan kyllästyneen betonin lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 1,4 W/mK – 3,6 W/mK. (Neville 2011, s. 377; Mehta ja Monteiro 2014, s. 107)

Ominaislämpökapasiteetti puolestaan kuvaa betonin kykyä varastoida lämpöä itseensä. Ominaislämpökapasiteetin arvoon ei betonin runkoaineen mineralogisella koostumuksella ole juurikaan vaikutusta, mutta betonin kosteuspitoisuus vaikuttaa arvoon huomattavasti. Veden suuresta ominaislämpökapasiteetista johtuen, betonin ominaislämpökapasiteetti nousee merkittävästi betonin kosteuspitoisuuden noustessa. Lämpökapasiteetin arvo nousee lisäksi betonin lämpötilan noustessa sekä tiheyden laskiessa, mutta lämpötilan ja tiheyden vaikutus on merkittävästi kosteuden vaikutusta pienempää. Betonin ominaislämpökapasiteetin arvo vaihtelee välillä 840 – 1170 J/kg°C. (Neville 2011 s. 379 & Mehta ja Monteiro 2014 s. 107)

Taulukko 8 Betonin lämmönjohtavuuden arvoja kosteuspitoisuuden funktiona (RIL 255).

Betoni (T = 0 °C)							
w (g/kg)	0	10	20	30	40	50	60
λ (W/mK)	1,16	1,19	1,24	2,46	2,61	2,71	2,78

Kosteuden liikkuminen betonissa

Tiiviin ja halkeilemattoman betonirakenteen läpi kosteutta siirtyy pääosin kapillaarisesti ja diffuusion vaikutuksesta. Betonin epätiivelyskohtien läpi kosteutta voi siirtyä myös konvektion avulla. Konvektiovirran kasteleva vaikutus saatetaan huomata kohonneina kosteuspitoisuuksina esimerkiksi halkeamien tai liitosten ympärillä. Kapillaarisesti ja diffuusion vaikutuksesta tapahtuvaan kosteuden liikkumiseen kovettuneessa betonissa vaikuttaa pääasiassa sementtikiven huokoisuus ja huokosrakenne. Huokosrakenteella tarkoitetaan huokosten kokoa, jakaumaa, muotoa, mutkittelevuutta ja jatkuvuutta. Betonin kosteuden läpäisevyyden kannalta merkittävimpiä ovat jatkuvat huokokset, joiden halkaisija on vähintään 120 nm. Tätä pienemmillä huokosilla sekä huokosilla, jotka eivät ole jatkuvia, ei juuri ole merkitystä betonin kosteuden läpäisevyyden kannalta. Myöskään huokosilla, jotka sisältävät adsorboitunutta vettä tai joiden sisäänkäynti on liian pieni, vaikkakin itse huokosen koko olisi riittävä, ei ole merkitystä kosteuden siirtymisen kannalta. (Neville 2011, s. 485)

Kapillaarihuokokset muodostavat yhtenäisen verkoston ja niiden koko on yleensä riittävä veden läpäisevyyden kannalta, joten ne ovat pääosin vastuussa sementin kosteuden läpäisevyydestä. Geelihuokokset puolestaan ovat niin pieniä, ettei niillä ole vaikutusta sementin vedenläpäisevyyteen. Sementtikiven ja runkoaineen rajapinnalla sekä itse runkoaineessa olevat huokokset ovat tavallisesti suurempia kuin sementtikiven sisältämät huokokset, mutta eivät muodosta yhtenäistä verkostoa betonin läpi. Sama pätee myös tiivistys- ja suojahuokosiin. (Neville 2011, s. 32, 485)

Kapillaarihuokosten koko pienenee ja niiden määrä sementtigelissä laskee hydrataation edetessä sekä v/s-suhteen laskiessa. Näin ollen, mitä pidemmälle hydrataatio etenee, ja mitä pienempi betonin v/s-suhde on, sitä pienempi on myös betonin kosteuden läpäisevyys. Betonissa, jonka v/s-suhde on alle 0,6, tapahtuu lisäksi kapillaarihuokosten segmentoitumista, jolloin huokokset eivät enää muodosta yhtenäistä verkostoa ja betonin kosteuden läpäisevyys laskee jyrkästi. (Neville 2011, s. 492) Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että vesi-sementti suhde on yksi merkittävimmistä tekijöistä betonin kosteuden läpäisevyyden kannalta (esim. Henry ja Kurtz 1963; Nilsson 2002). Hydrataation vaikutuksen betonin kosteuden läpäisevyyden kannalta on huomannut mm. Banthia ja Mindess (1989).

Myös betonin seosaineilla on vaikutusta betonin kosteuden läpäisevyyteen. Silikajauhe pienentää betonin kosteuden läpäisevyyttä, tosin silikajauheen määrällä betonissa ei juurikaan ole vaikutusta (Banthia ja Mindess 1989). Lentotuhka lisää betonin veden läpäisevyyttä nuorella iällä, mutta tekee betonista ajan saatossa huomattavasti tiheämpää, jolloin betonin veden läpäisevyys laskee (Neville 2011, s. 662). Masuunikuona pienentää betonin kosteuden läpäisevyyttä merkittävästi, mutta samalla kalsiumhydroksidien määrä sementissä vähenee, jolloin betonin karbonatisoitumisen riski kasvaa. Kiihtynyt karbonatisoituminen saattaa ilmetä betonin kosteuden läpäisevyyden kasvamisena (Neville 2011, s. 667). Raudoitteella ei ole tutkimuksissa huomattu olevan merkitystä betonin kosteuden läpäisevyyteen (Henry & Kurtz 1963).

Kosteustekniset ominaisuudet

Betonin kosteusteknisiä ominaisuuksia ovat mm. konvektiivinen kosteudenläpäisevyys (*coefficient of permeability*), vesihöyrynläpäisevyys (*diffusion coefficient*) ja kapillaarinen kosteudenläpäisevyys (*sorptivity*). Edellä mainituista ominaisuuksista alapohjarakenteen kannalta merkittävimpiä ovat vesihöyrynläpäisevyys (δ) sekä kapillaarinen kosteudenläpäisevyys, eli kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti ($D_{w,s}$). Alla olevassa taulukossa (*Taulukko 9*) on annettu arvoja eri v/s-suhteen betonien vesihöyrynläpäisevyydelle suhteellisen kosteuden funktiona. Arvot sisältävät kapillaarisen kosteuden siirron. *Taulukko 10* on puolestaan annettu eri v/s-suhteen betonien kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin arvoja betonin kosteuspitoisuuden funktiona.

Taulukko 9 Useamman vuoden vanhan, eri v/s-suhteen betonin vesihöyrynläpäisevyyden arvoja suhteellisen kosteuden funktiona lämpötilassa + 20 °C (RIL 255).

Betoni (v/s = 0,4)				
<i>RH</i> (%)	35...70	70...80	80...90	90...95
$\delta_v \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	0,15	0,25	0,35	0,5
Betoni (v/s = 0,5)				
<i>RH</i> (%)	35...70	70...80	80...90	90...95
$\delta_v \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	0,15	0,25	0,7	2
Betoni (v/s = 0,6)				
<i>RH</i> (%)	35...70	70...80	80...90	90...95
$\delta_v \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	0,2	0,3	0,8	3,5
Betoni (v/s = 0,7)				
<i>RH</i> (%)	35...70	70...80	80...90	90...95
$\delta_v \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	0,2	0,3	0,8	3,5

Taulukko 10 Kahden eri v/s-suhteen betonin kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin arvot betonin kosteuspitoisuuden funktiona (Vinha et al. 2013).

Betoni (v/s < 0,6)						
<i>w</i> (kg/m ³)	0	72	85	100	118	
$D_{w,s}$ (m ² /s)	0	$7,4 \cdot 10^{-11}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	
Betoni (v/s > 0,6)						
<i>w</i> (kg/m ³)	0	29	72	100	116	130
$D_{w,s}$ (m ² /s)	$1 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$

4.2 Täyttömaa

Täyttömaan rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin vaikuttaa mm. maa-aineksen raekoko, tiiveys, kosteuspitoisuus sekä mineraalikoostumus. Täyttömaana käytetään yleensä tiivistettyä soraa, mutta vanhoissa rakennuksissa täyttökerros on usein hiekkaa.

Täyttömaan lämmönjohtavuuteen vaikuttaa maa-aineksen mineraalikoostumuksen lisäksi vahvasti maan kosteuspitoisuus sekä maan huokosissa oleva ilmamäärä. Vesi johtaa lämpöä huomattavasti ilmaa tehokkaammin, joten maa-aineksen kosteuspitoisuuden noustessa, maan lämmönjohtavuus kasvaa. Kosteuspitoisuus vaikuttaa myös maa-aineksen ominaislämpökapasiteetin suuruuteen. Veden ominaislämpökapasiteetti on huomattavasti ilmaa suurempi, joten kosteuspitoisuuden noustessa myös ominaislämpökapasiteetti nousee. Leivo ja Rantala (2000) mukaan maan kosteuspitoisuuden noustessa ominaislämpökapasiteetti voi kasvaa noin kolmin- tai nelinkertaiseksi, mutta lämmönjohtavuus voi jopa 100-kertaistua. Täyttömaan kosteustekniset ominaisuudet kuten kapillaarinen nousukorkeus sekä vedenläpäisevyys riippuvat pääosin maa-aineksen rakeisuudesta. Alla olevassa taulukossa (*Taulukko 11*) on annettu lämpö- ja kosteusteknisiä arvoja eri maalajeille. Arvot on määritelty maalajien ollessa pohjavedenpinnan yläpuolella.

Taulukko 11 Eri maalajien lämmönjohtavuus (λ), vedenläpäisevyys (k) ja kapillaarinen nousukorkeus (H) (RIL 255).

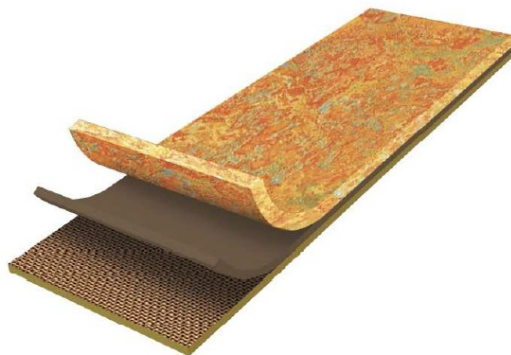
	Savi	Siltti	Hiekka	Sora
λ (W/mK)	1,5 – 3,5	1,5 – 3,5	1 – 2,2	1 – 2,2
k (m/s)	$< 10^{-9}$	$10^{-5} - 10^{-9}$	$10^{-2} - 10^{-6}$	$10^{-1} - 10^{-3}$
H (m)	> 8	1,5 – 12	0,1 – 3,5	$< 0,1$ (pesty sora)

4.3 Lattiapäällysteet

Lattiapäällyste valitaan tavallisesti tilan käyttötarkoituksen mukaan, mutta päällystettä valittaessa tulee tuntea erityisesti päällystettävän lattiarakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytyminen sekä päällysteen lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Päällysteiden lämpö- ja kosteusteknisissä ominaisuuksissa on suuria tuotekohtaisia eroja. Päällysteet jaetaan tavallisesti alustaan liimattaviin sekä kelluvana asennettaviin päällysteisiin. Pinnoitteilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa ns. pinnoitusmassoja kuten epokseja, polyuretaaneja ja akryyleja.

Linoleumi

Linoleumi on vanha 1800-luvulta peräisin oleva päällyste, joka koostuu lähes kokonaan luonnon omista raaka-aineista. Linoleumi valmistetaan kiinnittämällä juuttikankaan päälle mm. kuusipuu- korkki-, ja kalkkikivijauheesta sekä väriaineista koostuva homogeeninen massa, jonka sidosaineena toimii pellavakasvin siemenistä saatava pellavaöljy (*Kuva 18*). Linoleumi kiinnitetään alustaansa usein liimaamalla, mutta markkinoilla on myös kelluvana asennettavia lukkopontillisia linoleumi-päällysteitä. Linoleumin sanotaan kestävän huonosti kosteutta sekä korkean PH:n omaavia puhdistusaineita/vahoja. Materiaalivalmistajien mukaan uusimmat linoleumituotteet kuitenkin kestävät kosteutta ja korkeita PH-pitoisuuksia hyvin. (RIL 255; Forbo 2017a; c; Helamaa 2004; Palomäki 2011).



Kuva 18 Linoleumin rakenne (Forbo 2017a).

Markkinoilla olevien linoleumi-tuotteiden paksuus on tavallisesti 2 – 6 mm. Linoleumin lämmönjohtavuus on noin 0,17 W/mK ja ominaislämpökapasiteetti 1400 J/kgK (RIL 255). Linoleumin vesihöyrynläpäisevyys on noin $7 - 9 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, joka vastaa 2,5 mm paksulle Linoleumille S_d -arvoa 2 – 9 m. (Lindberg et al. 2002; SP 2014; Eronen et al. 2001; SFS-EN ISO 10456)

Muovipäällysteet

Muovipäällysteillä tarkoitetaan tässä muovimattoja, -laattoja sekä -lankkuja. Muovimattojen pääraaka-aineena on tavallisesti polyvinyylikloridi eli PVC. PVC itsessään on hauras aine, mutta pehmittimiä, eli ftalaatteja lisäämällä siitä saadaan valmistettua notkeita ja taipuisia tuotteita. Muovimatoissa tavallisimmin käytettyjä ftalaatteja olivat dietyyliheksyyli (DEPH) ja bentsyylibutyli (BBP), kunnes molemmat luokiteltiin lisääntymiselle vaaralliseksi. Tämän jälkeen niiden käyttö on vähentynyt huomattavasti. Korvaavia ftalaatteja ovat mm. diisononyyli (DINP) ja di-isodekyyli (DIDP), joiden ei ainakaan vielä ole todettu aiheuttavan terveyshaittoja. (Työterveyslaitos 2011)

Muovimatot jaetaan tavallisesti kolmeen eri ryhmään niiden rakenteen mukaan: homogeeniset muovimatot, kerrokselliset muovimatot ja heterogeeniset muovimatot. Homogeeniset muovimatot soveltuvat parhaiten kovaa kulutuksenkestoa vaativiin tiloihin. Yleensä muovimatot liimataan alustansa, mutta markkinoilla on myös irtoasennettavia PVC-mattoja.

Muovimatot ovat paksuudeltaan noin 1,5 – 4 mm. Muovimattojen lämmönjohtavuus on noin 0,25 W/mK ja ominaislämpökapasiteetti 1400 J/kgK. (RIL 255) Julkisissa tiloissa käytettävien homogeenisten muovimattojen vesihöyrynläpäisevyys on matala, noin $0,3 - 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, joka vastaa 2 mm paksulle muovimatolle S_d -arvoa 30 – 170 m. Kevyemmän kulutuksen tiloissa käytettävien kerroksellisten muovimattojen S_d -arvo on tutkimusten mukaan vain hieman korkeampi kuin Linoleumeilla (S_d -arvo 4 – 10 m). Muovimattojen vesihöyrynläpäisevyyksissä on suuria eroja eri tutkimusten välillä. (Lindberg et al. 2002; VTT 2017a; Eronen et al. 2001)

Kvartsivinyylilaattojen (Hovilaatat) pääraaka-aineena on polyvinyylikloridi (PVC), kuten muovimatoilla, mutta täyteaineiden osuus laatoissa on huomattavasti muovimattoja suurempi (osuus noin 70 %). Laatat sisältävät vähemmän pehmittimiä kuin muovimatot, mistä johtuen laatat ovat kovempia ja vähemmän taipuisia. Laatoissa käytettävät pehmittimet ovat nykyään usein kasviöljypohjaisia ja ftalaattittomia. Vinyylilaattojen täyteaineena käytettiin ennen asbestia (vinyylasbestilaatat), mutta nykyään asbesti on korvattu kvartsihiekillä.

Vanha asbestivinyylilaatta on kooltaan tavallisesti 250 x 250 mm, kun taas kvartsivinyylilaatan koko on normaalista 300 x 300 mm tai 610 x 610 mm. (Upofloor 2017b; RIL 255)

Kvartsivinyylilaattojen paksuus on noin 2 mm ja sen lämpötekniset ominaisuudet ovat suurin piirtein PVC-tuotteita vastaavia. Kvartsivinyylilaattojen vesihöyrynläpäisevyys on noin puolet homogeenisten muovimattojen vesihöyrynläpäisevyydestä, eli laatan S_d -arvo on luokkaa 15 – 100 m. Kvartsivinyylilaattojen kosteuden läpäisevyyteen vaikuttaa lisäksi laattojen väliset saumat ja niiden leveys, tosin saumojen rakennetta kuivattava vaikutus sijoittuu vain saumojen välittömään läheisyyteen. (Upofloor 2017e)

Kvartsivinyylilaattojen lisäksi markkinoilla on erilaisia kelluvana asennettavia lukkopontillisia vinyylilankkuja. Lukkopontillisten lankkujen paksuus on noin 5 mm. Lankkujen lämmönjohtavuus on samaa luokkaa kuin PVC-matoilla, eli noin 0,25 W/mK. (Gerflor 2017) Lankkujen vesihöyrynläpäisyarvoista ei tätä työtä varten löydetty tutkimustuloksia, mutta PVC:stä ja lankkujen paksuudesta johtuen, voidaan vinyylilankkuja pitää varsin vesihöyrytiivinä materiaalina. Lukkoponttiliitos ei myöskään läpäise vesihöyryä samaan tapaan kuin esimerkiksi puskuun asennettavien laattojen välinen liitos, joten vinyylilankkujen saumojen rakennetta kuivattava vaikutus on pieni. Kelluvilla päällysteillä alapuolisen askeläänieristeen vaikutus rakenteen lämpö- ja kosteustekniseen käyttäytymiseen tulee myös huomioida suunnittelussa.

Markkinoilla on lisäksi muovipäällysteitä, jotka eivät sisällä ollenkaan PVC:tä tai pehmittimiä (ftalaatteja), vaan ne valmistetaan esimerkiksi termoplastisista polymeereistä sekä luonnonmineraaleista. Näiden mm. Enomer-tuotenimellä markkinoilla olevien päällysteiden kulutusta kestävä pintakerros valmistetaan ionomeeristä, Enomeristä valmistetaan sekä laattoja, lankkuja että mattoja, jotka liimataan kiinni alustaansa. (Upofloor 2017c)

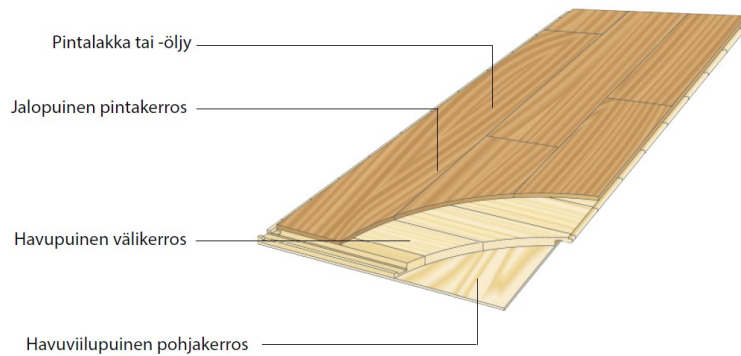
Enomer-tuotteiden paksuus on tavallisesti noin 2 mm. Tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet ovat hyvin lähellä PVC-mattojen ominaisuuksia. Enomer-muovimaton S_d -arvo on samaa suuruusluokkaa kuin PVC-maton ($S_d \sim 30 - 200$ m). (Upofloor 2017c,d; VTT 2017b) VTT (2006) mukaan Enomer-laatta kuitenkin läpäisee vesihöyryä selvästi Enomer-mattoja paremmin ($S_d \sim 8$ m).

Puupohjaiset päällysteet

Puupohjaisia päällysteitä ovat mm. parketti, laminaatti, korkki sekä höylätyt lattialaudat (HLL). Päällysteet voidaan asentaa kelluvana, liimata (pois lukien laminaatti) tai naulata (pontatut lankut ja osa parketeista) alustaansa. Puupohjaiset päällysteet eivät tavallisesti sovellu kovaa kulutuksenkestoa vaativiin tiloihin, vaan lähinnä asumistiloihin. Puupohjaisia päällysteitä ei myöskään suositella asennettaviksi, jos tiloissa on kova kosteusrasitus, tai alapohjarakenteen kosteuspiitoisuus on korkea. Korkea kosteuspiitoisuus saattaa aiheuttaa puupohjaisissa tuotteissa mikrobikasvustoa tai elämisen aiheuttamaa rakoilua ja halkeamista. Toisaalta puupohjaisten päällysteiden vesihöyrynläpäisevyys on korkea, jolloin kosteuspiitoisuuden esimerkiksi betonilaatan ja päällysteen välissä ei pitäisi nousta päällysteen kannalta kriittiselle tasolle.

Sauva- ja mosaiikkiparketit koostuvat asennusverkkoon kiinnitetyistä tai irtonaisista käsittelemättömistä massiivipuusauvoista. Sauva- ja mosaiikkiparketit liimataan alustaansa, jonka jälkeen parketin pinta hiotaan ja pintakäsitellään. Lautaparketit puolestaan koostuvat ristiin liimatuista lamelleista, joissa pinta- ja pohjakerros ovat parketin pituussuuntaisesti, ja

parketin elämistä rajoittava välikerros poikittain parketin pituussuuntaan nähden (*Kuva 19*). Lautaparketti asennetaan kelluvana. (RIL 255)



Kuva 19 Lautaparketin rakenne (Muokattuna lähteestä *Puuinfo 2017b*).

Parkettien lämmönjohtavuus on samaa suuruusluokkaa kuin puulla, eli $\lambda \sim 0,15 \text{ W/mK}$. (Puuinfo 2017b) Parkettien vesihöyrynläpäisyominaisuuksia ovat tutkineet kattavasti mm. Eronen et al. (2001). Tutkimuksen mukaan käsittelemättömän tammiparketin vesihöyrynläpäisevyys on noin $1200 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ($S_d \sim 0,3 \text{ m}$) ja pyökkiparketin puolestaan noin $2000 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ($S_d \sim 0,2 \text{ m}$). S_d -arvo laskettu, kun parketin paksuus 15 mm. Pinnan lakkaus sekä mahdollinen parkettiliima kuitenkin pienentävät päällysteen vesihöyrynläpäisevyyttä. Lakatun 15 mm paksun tammiparketin S_d -arvo on noin 0,7 m ja pyökillä noin 0,6 m. Liiman vaikutus vesihöyrynläpäisevyyteen riippuu siitä, onko liima vesiohenteista vai 2-komponenttista polyuretaaniliimaa. Vesiohenteisen liiman vaikutus parketin vesihöyrynläpäisevyyteen on huomattavasti pienempi kuin polyuretaaniliiman.

Laminaatti koostuu useista eri materiaalikerroksista ja se asennetaan lähes aina kelluvana. Laminaatin kulutuspinna on muovikalvo, johon on kiinnitetty kuosipaperi. Laminaatin runkolevynä toimii kova puukuitulevy kuten HDF ja pohjakerroksena tiivis ns. vastavetolaminaatti (*Kuva 20*). Laminaatin paksuus on tavallisesti 7 – 9 mm. Laminaatin lämpö- ja kosteusteknisistä ominaisuuksista ei kirjallisuudesta löydy juurikaan tietoa.



Kuva 20 Laminaattilankun rakenne (Karitma 2017).

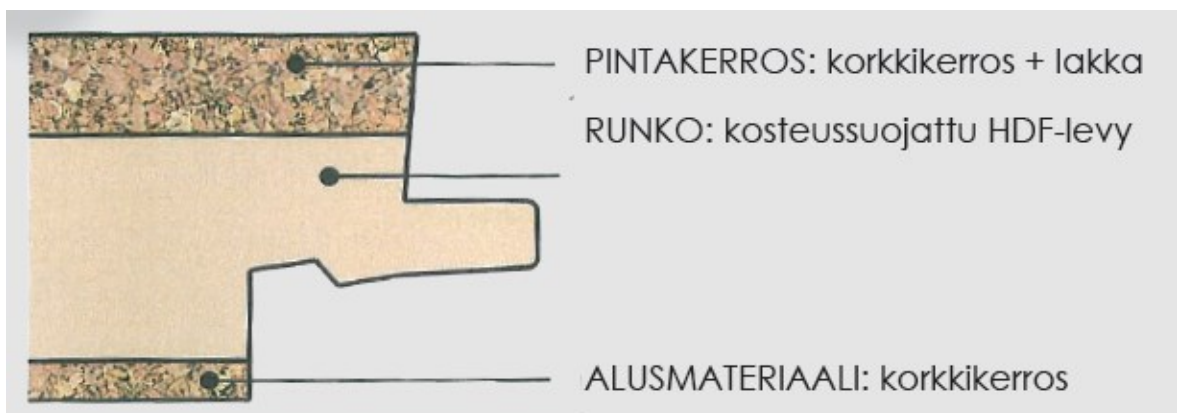
Lankkulattia on perinteinen puulattia, joka koostuu pontatuista yleensä mänty- tai kuusilaudoista. Perinteisen höylätyn lattialaudan (HLL) mitat ovat noin 95 x 28 mm (*Kuva 21*). Betonilattian päälle lankut voidaan asentaa esimerkiksi kelluvana siten, että lankut liimataan toisiinsa ponteista ja lankkujen alle asennetaan tasauskerros, kuten askeläänieriste. Lankkulattian lämpö- ja kosteustekniset arvot ovat männylle ja kuuselle syitä vasten kohtisuorassa

annettuja arvoja vastaavat. Lankkujen lämmönjohtavuus on noin 0,15 W/mK ja vesihöyrynläpäisevyys noin $100 - 500 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, jolloin 28 mm paksun lankun S_d -arvo on välillä 1 – 20 m. (SFS-EN ISO 10456; RIL 255)



Kuva 21 Ympäripontattu lattialauta (Puuinfo 2017c).

Korkkilattiat kuuluvat myös puupohjaisiin päällysteisiin ja ne asennetaan tavallisesti kelluvana, tosin joissain tapauksissa ne voidaan myös liimata alustansa. Puhtaan korkkilaatan lämmönjohtavuus on alhainen $\lambda \sim 0,065 \text{ W/mK}$, minkä johdosta korkki tuntuu mukavan lämpimältä jalan alla. Korkin vesihöyrynläpäisevyys on suuri, noin $640 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, mikä tarkoittaa 11 mm paksulle korkille $S_d \sim 0,5 \text{ m}$. Korkkia käytetään useissa päällysteissä yhdessä jonkun toisen materiaalin kanssa, jotta saadaan kestävä ja helppohoitoinen tuote. Korkkilankkujen runkona käytetään usein esimerkiksi puukuitulevyä (Kuva 22). Myös kuitulevyn vesihöyrynläpäisevyys on suuri $> 1000 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, joten korkkilankun vesihöyrynläpäisevyyttä laskee ainoastaan pinnassa mahdollisesti oleva lakkakerros. (SFS-EN ISO 10456)

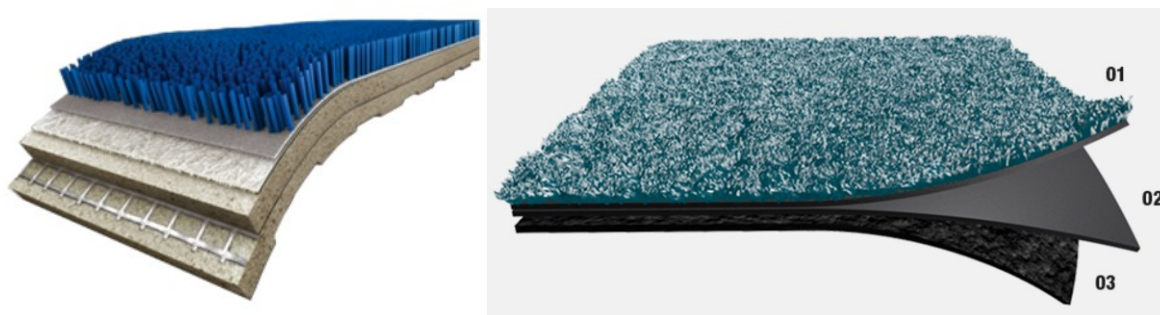


Kuva 22 Korkkilankkujen rakenne (Muokattuna lähteestä Triofloor 2017).

Tekstiilipäällysteet

Tekstiilipäällysteisiin kuuluu tekstiilimatot- ja laatat, joiden pinta koostuu tekstiilistä kuten nylon-kuidusta. Tekstiilipäällysteitä on lukuisia erilaisia ja niiden lämpö- ja kosteusteknisiin ominaisuuksiin vaikuttaa pääasiassa tekstiilikerroksen alapuoliset kerrokset. Parhaiten vesi-
höyryä läpäisevät tekstiilimatot, joissa kuidut on liimattu suoraan pohjakankaaseen ilman muita kerroksia. Tällaisia tekstiilimattoja käytetään lattiapäällysteenä tavallisesti erilaisilla messuilla ja näyttelyillä. Tiiviimpiä tuotteita ovat esimerkiksi erilaiset matot ja laatat, joissa kuitujen alapuolella on erikoisvinyyli- tai bitumikerros (Kuva 23). Tekstiilipäällysteen tekstiilikerroksen lämmönjohtavuus on alhainen, noin 0,06 W/mK. Suoraan pohjakankaaseen liimatun tekstiilimaton vesihöyrynläpäisevyys on noin $5000 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, joka on tässä luvussa

tarkasteltavista päällysteistä suurin. (SFS-EN ISO 10456) Alapuolinen vinyyli- tai bitumi-kerros tosin laskee läpäisevyyttä merkittävästi. Joidenkin tutkimusten mukaan tekstiilipäällysteet voivat olla tiiviimpiä kuin homogeeniset muovimatot. (Upofloor 2017e)



Kuva 23 Erikoisvinyylipohjainen tekstiilimatto ja bitumipohjainen tekstiilimatto (Forbo 2017b; Modulyss 2017).

Keraamiset laatat

Keraamisiin laattoihin luetaan mm. klinkkeri-, kaakeli- ja tiililaatat. Keraamiset laatat liimataan taustaansa yleensä sementtipohjaisella kiinnityslaastilla. Keraamiset laatat valmistetaan pääasiassa savesta, kvartsista ja maasälvästä, mutta lisäksi valmistamisessa voidaan käyttää mm. talkkia, wollastoniittia, kalsiittia ja dolomiittia. Laatat valmistetaan tavallisesti joko märkäpuristusmenetelmällä (ryhmä A) tai kuivapuristusmenetelmällä (ryhmä B). Valmistusprosessin lopuksi laatat poltetaan uunissa. Lisäksi on olemassa ryhmä C, johon kuuluvat laatat valmistetaan jollain muulla menetelmällä, kuten valamalla. (SIT 41-610079; RIL 255; RT 34-10763)

Laattojen polttoaste sekä uunin lämpötila vaikuttavat laatan ominaisuuksiin kuten vedenimukykyyn. Vedenimukyky on kääntäen verrannollinen laatan polttoasteeseen (sintraantumisasteeseen). Mitä pidemmälle ja mitä suuremmassa lämpötilassa laatat poltetaan, sitä alhaisemmaksi laattojen vedenimukyky muodostuu. Laattojen pinnat voidaan myös lasittaa, mikä parantaa laatan kestävyyttä ja samalla suojaa laattaa esimerkiksi kemiallisilta rasituksilta. Lasitus pienentää laatan yläpinnan vedenimukykyä sekä laatan vesihöyrynläpäisevyyttä. Laatat jaetaan usein valmistusmenetelmän sekä vedenimukyvyn perusteella alla olevan taulukon mukaisesti ryhmiin (Taulukko 12). (SIT 41-610079; RT 34-10997; RT 34-10763)

Taulukko 12 Laatat voidaan jakaa ryhmiin niiden vedenimukyvyn mukaan (SFS-EN 14411).

Valmistustapa	Vedenimukyky, E				
	ryhmä Ia	ryhmä Ib	ryhmä II a	ryhmä II b	ryhmä III
	$E < 0,5 \%$	$0,5 \% \leq E \leq 3 \%$	$3 \% < E \leq 6 \%$	$6 \% < E \leq 10 \%$	$E > 10 \%$
märkäpuristetut laatat	A Ia	A Ib	A IIa	A IIb	A III
kuivapuristetut laatat	B Ia	B Ib	B IIa	B IIb	B III
muulla tavoin valmistetut laatat		C Ib	C IIa	C IIb	C III

Ryhmään BIII kuuluvia laattoja kutsutaan kaakeleiksi. Kaakelilaattojen polttaminen lopetetaan heti sintraantumisen alkaessa, minkä johdosta niiden vedenimukyky on suuri ($> 10\%$). Kaakelit soveltuvat lähinnä sisätilojen seinälaatoituksiin. Kaakelilaattojen pinnat ovat aina lasitettuja. Kuivapuristetut laatat, jotka kuuluvat ryhmään BIIa ja BIIb, soveltuvat nekin vain sisätiloihin, korkeasta vedenimukyvystä johtuen ($3\% < E \leq 10\%$). Kuivapuristettuja laattoja, joiden vedenimukyky on pieni ($0,5\% \leq E \leq 3\%$) kutsutaan klinkkereiksi ja ne kuuluvat ryhmään BIb. Klinkkereitä löytyy sekä lasitettuina että lasittamattomina ja ne soveltuvat käytettäväksi lähes kaikkiin kohteisiin. Erityisen kovaa käyttöä tai mittatarkkuutta vaativissa tiloissa käytetään ryhmään BIa kuuluvia, täysin sintraantuneita laattoja, joita kutsutaan yleensä porcellanatolaatoiksi. Porcellanatolaattoja löytyy sekä lasitettuina että lasittamattomina. Laattojen vedenimukyky on todella alhainen ($< 0,5\%$) ja laatat voidaan kiinnittää todella pienillä saumaleveyksillä niiden mittatarkkuudesta johtuen. (RT 34-10997; SIT 41-610079)

Keraamisten laattojen lämmönjohtavuus on noin $1,3 \text{ W/mK}$ ja ominaislämpökapasiteetti noin 840 J/kgK . Laatat johtavat lämpöä huomattavasti tehokkaammin kuin muut tässä luvussa käsitellyt lattiapäällysteet. Korkean lämmönjohtavuuden takia laatat tuntuvat usein kylmiltä jalan alla. Laattojen vesihöyrynläpäisevyydestä löytyy hyvin vähän tutkimustietoa. Standardissa SFS-EN ISO 10456 keraamisten laattojen diffuusionvastuskertoimen ilmoitetaan olevan äärettömän suuri. Vesihöyrynläpäisevyyden arvoon keraamisilla laatoilla vaikuttaa sintraantumisaste sekä pintakäsittely, kuten pinnan lasitus. Merkittävämpänä asiana laatoituksen vesihöyrynläpäisevyyden kannalta on laattojen välisten saumojen pinta-ala. Mitä enemmän laatoituksen pinta-alasta on saumaa, sitä paremmin rakenne pääsee kuivumaan. Saumatulle $150 \times 150 \times 6 \text{ mm}$ laatalle on annettu vesihöyrynläpäisevyyden arvoksi $84 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, jolloin 6 mm paksun laatoituksen S_d -arvo on noin $1,9 \text{ m}$. (RIL 255)

Pinnoitteet

Pinnoitteilla tarkoitetaan tässä työssä telalla tai lastalla levitettäviä pinnoitteita, joita käytetään yleensä lattioilla, jotka vaativat kovaa kulutuksen-, kemikaalin- tai kosteudenkestoa. Pinnoitteet ovat tavallisesti 1- tai 2-komponenttisia massoja, jotka koostuvat perusosasta (sideaine) ja kovetteesta (vain 2-komponenttisilla). Pinnoitteiden sideaineina käytetään polymeerejä kuten epoksit, akryylit tai polyuretaanit. Pinnoitteet ovat joko vesiohenteisia, liuotinhohteisia tai liuotteettomia, joskin nykyään käytetään pääasiassa vesiohenteisia ja liuotteettomia massoja. Erilaisia pinnoitetyyppejä ovat esimerkiksi levitettävät, itsesiliävät ja hiertopinnoitteet. Hiertopinnoitteissa massan joukkoon lisätään täytehiekkaa (raekoko tavallisesti $0,3 - 1,2 \text{ mm}$), joka parantaa pinnoitteen kulutuksenkestoa ja vähentää pinnan liukautta. (Nanten 2017; RT 29-1105; Piimat 2013; by54/BLY12 2010)

Pinnoitteiden paksuudet ovat massapinnoitteena tavallisesti noin $1 - 5 \text{ mm}$, ja telattuna alle 1 mm . Sideaineesta riippumatta massojen kapillaarisen kosteudenimeytymisen sekä vedenläpäisevyyden arvot ovat tavallisesti alhaisia, luokkaa $< 0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$. Massojen vesihöyrynläpäisevyyksissä on kuitenkin selviä eroja sideaineesta sekä ohenteesta riippuen. (Nanten 2017) Massat jaetaan tavallisesti kolmeen eri luokkaan tuotteen vesihöyrynläpäisevyydestä riippuen (Taulukko 13).

Taulukko 13 Pinnoitemassojen vesihöyrynläpäisyluokat (SFS-EN 1504-2).

luokka I	luokka II	luokka III
----------	-----------	------------

vesihöyryä läpäisevä	ei vesihöyrytiivis, mutta ei myöskään vesihöyryä läpäisevä	vesihöyrytiivis
< 5 m	$5 \text{ m} \leq S_d \leq 50 \text{ m}$	> 50 m

Vesiohenteisille epoksinnoitteille on tyypillistä niiden korkea vesihöyrynläpäisevyys. Vesiohenteisten epoksinnoitteiden S_d -arvo voi olla alle 5 m. Polyuretaanipinnoitteet läpäisevät vesihöyryn tavallisesti epoksinnoitteita heikommin. Polyuretaanipinnoitteille luonteenomaista on niiden elastisuus sekä iskunkestävyys. Akryylipohjaiset massat puolestaan ovat erittäin vesihöyrytiiviitä. Akryylimassojen S_d -arvo voi olla suurempi kuin 200 m. (Nanten 2017; VTT 2014; by54/BLY12 2010)

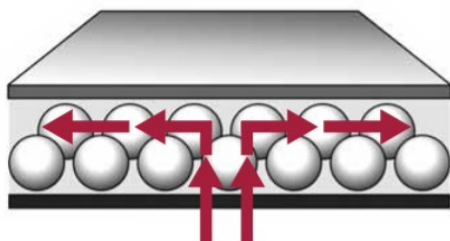
Kumipäällysteet

Kumipäällysteitä, kumimattoja tai kumilaattoja, käytetään muun muassa kovaa kulutuksenkestoa vaativissa kohteissa, kuten kuntosalien lattioissa. Kumipäällysteiden paksuus vaihtelee tuotteen mukaan, mutta on tavallisesti välillä 2 – 10 mm. Kumipäällysteiden lämmönjohtavuus on noin 0,17 W/mK. Kumipäällysteiden vesihöyrynläpäisevyys on samaa suuruusluokkaa kuin muovipäällysteillä, noin $2 - 3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, joka vastaa 3 mm kumimatolle S_d -arvoa $\sim 30 \text{ m}$. (SFS-EN ISO 10456)

Askeläänieristeet

Kelluvan päällystemateriaalin alapuolelle asennettava askeläänieriste määräytyy tavallisesti lattiaan kohdistuvien olosuhteiden kuten kosteuspitoisuuden mukaan. Rakenteissa, joissa päällystemateriaalia pyritään suojaamaan alapuolisen rakenteen korkealta kosteuspitoisuudelta, käytetään askeläänieristeitä, joiden vesihöyrynläpäisevyys on alhainen. Rakenteissa, joissa kosteusrasitus on pieni, voidaan askeläänieristeenä käyttää myös läpäisevämpiä materiaaleja.

Tiiviisiin askeläänieristeisiin kuuluvat esimerkiksi mineraalitäytteiset polyuretaanivaahdotmuovit sekä Tuplex. Tuplex koostuu kahdesta polyeteenimuovikalvosta, joiden välissä on polystyreenirakeita (Kuva 24). Ylempi kalvo on tiheää noin 0,04 – 0,06 mm paksua muovia ja alempi kalvo tiheydeltään alempaa 0,04 mm paksua muovia. Tuplexin kokonaispaksuus on noin 2 – 3 mm. Tuplexin lämmönjohtavuus on noin 0,036 – 0,05 W/mK, mutta vesihöyrynläpäisevyys ja S_d -arvon suuruus riippuu pääosin ylemmän muovin paksuudesta. Eri tutkimuksissa on Tuplexin S_d -arvoksi annettu 7 – 75 m. (Lindberg et al. 2002; VTT 2000; Kareliaparketti 2017; Pergo 2017a)



Kuva 24 Tuplex-askeläänieristeen rakenne (Kareliaparketti 2017).

Vesihöyryä paremmin läpäiseviä askeläänieristeitä ovat muun muassa bitumikorkkimatto, aaltopahvi, erilaiset vaahtomuovit, kuten polyeteenivaahtomuovi (solumuovi) ja puristettu polystyreenivaahtomuovi sekä tekstiilikuitukerroselliset askeläänieristeet. Bitumikorkkimaton S_d -arvo on Lindberg et al. (2002) mukaan vain noin 3 m, mutta muista askeläänieristeistä ei kirjallisuudesta löytynyt tutkimustietoa.

4.4 Mattoliimat

Mattoliimat ovat tavallisesti 1-komponenttisiä vesiohenteisia tai 2-komponenttisiä polyuretaaniliimoja. 2-komponenttisiä polyuretaanipohjaisia liimoja käytetään yleensä vain erikoiskohteissa, joissa liimoilta vaaditaan suurta kulutuksen- tai kosteudenkestoa. Asuinrakennuksissa, joissa liimojen kulutuksen- tai kosteudenkestovaatimukset ovat alhaisemmat, käytetään tavallisesti 1-komponenttisiä liimoja. Liimoissa käytettyjä sideaineita ovat muun muassa akrylaatti, polykloropreenikumilateksi (kontaktiliimat), polyvinyyliasetaatti (PVA), etyleenivinyylisasetaatti (EVA) ja muut keinopolymeerit. (Kiilto 2017a, b; RIL 255)

1-komponenttisen vesiohenteisen mattoliiman vesihöyrynläpäisevyys on matala, noin $2,5 \cdot 10^{-9}$ m/s. (Lindberg et al. 2002) Liimakerroksen paksuus on kuitenkin pieni, noin 0,2 mm, jolloin liimakerroksen S_d -arvoksi saadaan noin 2 m. Osa liimojen sideaineista sekä pehmittimistä sisältää mm. 2-etyyliheksanolia, mutta markkinoilla on myös liimoja, jotka ovat täysin ftalaatti- sekä 2-EH-vapaita. Lisäksi markkinoilla on kovia liimoja, jotka kestävät betonin alkalisuutta tavanomaisia liimoja paremmin. Kovien liimojen käytön yleistymistä kuitenkin rajoittaa niiden hankala käyttö. (Kiilto 2017a; b; RIL 255)

4.5 Lattiatasoite

Betonilaatan pinnan tasaamiseen tavallisesti käytettävä sementtipohjainen tasoite koostuu täyteaineesta (esim. luonnonhiekkia tai kalkkikivijauhe), sideaineesta (sementti), vedestä sekä mahdollisista lisäaineista. Tasoitteen rakennusfysikaalisiin ominaisuuksiin vaikuttavat pitkälti samat tekijät kuin betonissa. Lattiatasoitteen lämmönjohtavuus vaihtelee tavallisesti välillä 0,5 – 2,0 W/(mK). (RIL 255) Eronen et al. (2001) tutkimuksessa mukana olleen hienotasoitteen vesihöyrynläpäisevyys oli noin $500 \cdot 10^{-9}$ m²/s, mikä tarkoittaa 3 mm paksulle tasoitekerrokselle S_d -arvoa 0,15 m. Lindberg et al. (2002) mukaan lattian hienotasoitteiden vesihöyrynläpäisevyys vaihtelee välillä $300 - 900 \cdot 10^{-9}$ m²/s. Hienotasoite siis läpäisee vesihöyryä saman paksuiseen muovimattoon verrattuna noin 2 – 3 suuruusluokkaa enemmän, joten sen merkitys koko rakenteen vesihöyryn läpäisevyyden kannalta on pieni.

Markkinoilla on myös niin sanottuja matala-alkalisia tasoitteita, joiden sanotaan vähentävän betonin kosteuden ja alkalisuuden vaikutusta päällystemateriaalien emissioihin. Myös Räsänen et al. (1998) huomasivat heikosti emäksisen (matala-alkalisen) tasoitekerroksen päällysteen ja betonirakenteen välissä (pH ~ 10,5) vähentävän alapohjan korkean kosteuden ja betonin alkalisuuden vaikutusta päällysteiden ja liimojen hajottajana. Weber (2017) mukaan halkeilematon matala-alkalinen tasoitekerros estää betonin alkalien nousun päällyste-/liimakerrokseen ja näin ollen vähentää päällysteen/liimakerroksen vaurioitumisriskiä. Alexanderssonin (2004) mukaan matala-alkalinen, kalsiumaluminaattisementti pohjainen tasoite, toimii suojana ainakin 1-butanolin ja 2-etyyliheksanolin emissioita vastaan. Suojaavan tasoitekerroksen suositellaan olevan vähintään 5 mm paksu, vaikkakin tutkimuksen mukaan

vain 2 mm paksuinen kerros riitti suojaamaan emissioilta. Matala-alkalisen tasoitekerroksen suojaava vaikutus korostuu erityisesti korkean lujuuden omaavilla betoneilla, sekä betoneilla, joilla on korkea kosteuspitoisuus (Eronen et al. 1998). Weberin (2017) mukaan tasoi-
tekerros pysyy heikosti emäksisenä, niin kauan, kun rakenteen kosteuspitoisuus pysyy poissa kapillaarialueelta (RH alle $\sim 90\%$), koska betonin emäksisyys pystyy siirtymään tasoitteeseen ainoastaan kapillaarisesti. Kun kosteutta siirtyy pelkästään diffuusion avulla, pysyy tasoite matala-alkalisena. Myös rakenteen kasteleva kosteusvaurio (vesivahinko tms.) aiheuttaa sen, että tasoite voi menettää matala-alkalisuutensa. Heikosti emäksinen tasoitekerros ei kuitenkaan takaa rakenteen pintamateriaalien vaurioitumattomuutta, koska osa materiaaleista saattaa vaurioitua jo pelkästään kosteuspitoisuuden kasvaessa riittävän korkeaksi.

4.6 Pohjusteet

Pohjustusaineita, kuten primereita ja dispersioita käytetään yleensä betonin ja tasoitteen tai tasoitteen ja päällysteen, kuten vedeneristeen välissä parantamaan tuotteiden välistä tartuntaa. Pohjustus myös estää esimerkiksi tasoitteessa olevan veden liian nopean imeytymisen alla olevaan betoniin. Pohjustusaine levitetään tavallisesti ohuena kerroksena telalla tai pensselillä pohjustettavan materiaalin pintaan.

Betonin ja tasoitteen välissä käytettävät pohjusteet ovat tavallisesti vesiohenteisia pohjusteita, joiden sideaineena on yleensä akrylaatti- tai polyuretaanidispersio. (RT 29-11052) Dispersiokerroksen vesihöyrynläpäisevyys on noin $2 \cdot 10^{-9}$ m/s, joka vastaa 0,05 mm paksulle dispersiokerrokselle S_d -arvoa 0,6 m. (Eronen et al. 2001; RIL 255)

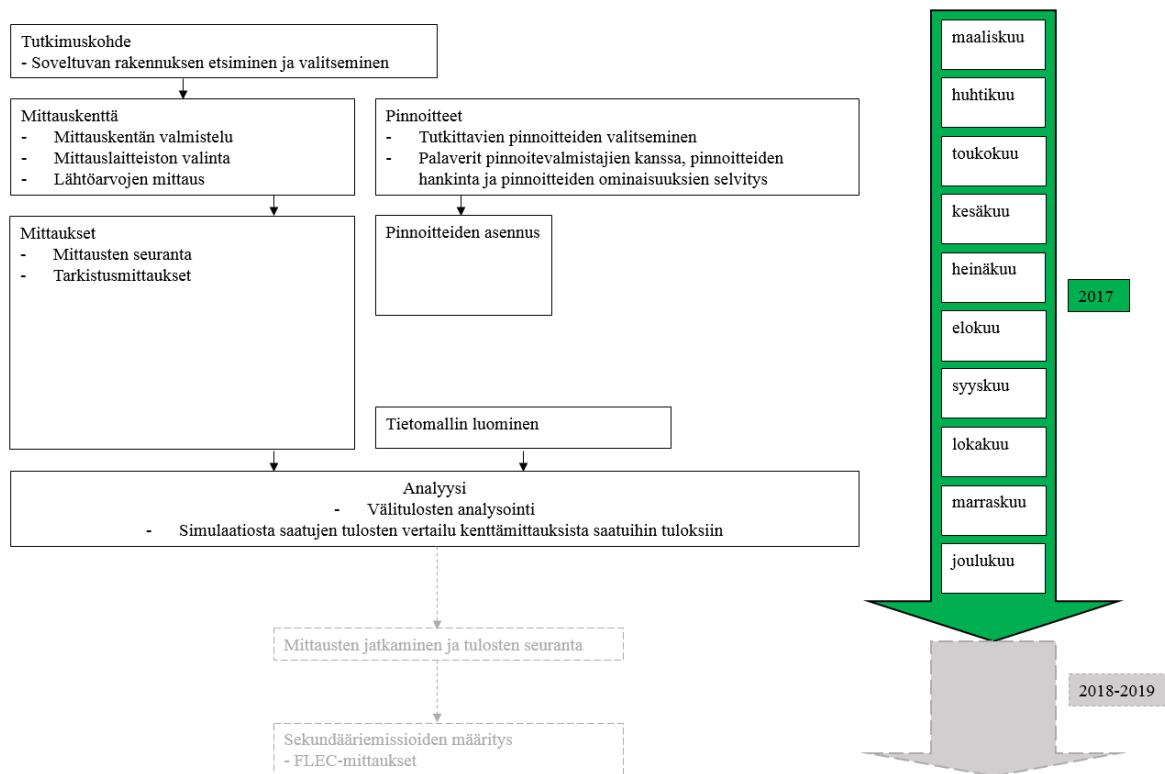
5 TUTKIMUKSET JA SIMULAATIO

5.1 Tutkimuksen kulku

Tutkimus käynnistyi maalis-huhtikuussa 2017. Tutkimuksen aluksi pyrittiin löytämään sopiva kohde kenttätutkimuksien aloittamista varten. Kohteeksi valikoitui Niemen toimintakeskus Lahdessa, mikä jäi tyhjilleen juuri ennen tutkimuksen alkamista sisäilmaongelmien takia. Toimintakeskuksen tiloista mittauksia varten valittiin kellaritilat, jotka olivat lämpö- ja kosteusteknisesti päällysteiden kannalta haastavimpia. Kellarista mittauksia varten valittiin kaksi erikokoista huonetta, huone A (iso huone) sekä huone B (pieni huone).

Mittauspaikan löydyttyä alkoivat mittauskenttien valmistelutyöt sekä alkuolosuhteisiin liittyvät mittaukset (huhti-kesäkuu). Samaan aikaan alettiin etsiä/kerätä päällysteitä tutkimusta varten. Mittauskenttien valmistuttua, ja alkuolosuhteiden ollessa selvillä, aloitettiin mittauskenttien päällystäminen (kesä-elokuu). Mittaukset kohteessa aloitettiin heti ensimmäisten pintamateriaalien asentamisen jälkeen ja mittauksia pyrittiin suorittamaan noin kahden viikon välein, aina loka-marraskuun vaihteeseen asti, jolloin viimeiset tulokset tätä tutkimusta varten kirjattiin ylös. Tietomallin luominen ja materiaaliominaisuuksien määrittäminen tehtiin syys-lokakuun aikana. Mallista saatujen tulosten vertailu kenttämittauksista saatuihin tuloksiin suoritettiin marraskuun aikana.

Tutkimuksen kulkua havainnollistaa alla oleva kuva (Kuva 25), jossa tutkimuksen eri vaiheet ovat kuvattuina aikajärjestyksessä ja –skaalassa.



Kuva 25 Tutkimuksen kulku.

5.2 Kenttätutkimukset

5.2.1 Mittauskenttien valmistelut

Kenttämittauksia varten valmisteltiin kaksi eri mittauskenttää huhti-kesäkuun aikana. Toinen mittauskenttä tehtiin huoneeseen A ja toinen huoneeseen B. Huoneesta A poistettiin ensin lattiassa olleet mosaiikkibetonilaatat, minkä jälkeen betonin pintaan tasoitettiin 1 m x 1 m kokoiset ruudut päällysteitä varten (Kuva 26). Tasoitteina käytettiin Weberin matala-alikalaisia lattiatasoiteita (Taulukko 14). Huoneen B lattiasta hiottiin betonimaali pois ja pinta jätettiin puhtaalle betonille (Kuva 27). Isoon huoneeseen tehtiin ruudut 1 – 18 ja pieneen huoneeseen ruudut 19 – 23. Tasoitekerrosten annettiin kuivua noin kaksi viikkoa ennen ensimmäisten päällysteiden asentamista.



Kuva 26 Huoneen A lattiasta poistettiin vanhat mosaiikkibetonilaatat, minkä jälkeen lattiaan tasoitettiin ruudut (1 – 18) päällysteitä varten.



Kuva 27 Huoneen B lattiasta hiottiin betonimaali pois. Pintaa ei tasoitettu vaan se jätettiin betonipinnalle (Ruudut 19 – 23).

Taulukko 14 Huoneessa A käytetyt tasoitteet ja dispersiot.

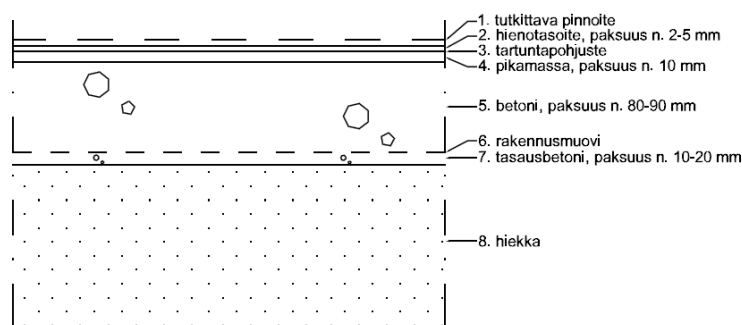
Asennuspäivä	Materiaali	Valmistaja	Tuote	Paksuus
14.6.	matala-alkalinen pikalattiamassa	Weber	Vetonit 6000	10-20 mm
16.6.	tartuntapohjuste	Weber	Vetonit MD 16	-
16.6.	matala-alkalinen hieno lattiatasoite	Weber	Vetonit 3100	1-5 mm

5.2.2 Tutkittu rakenne

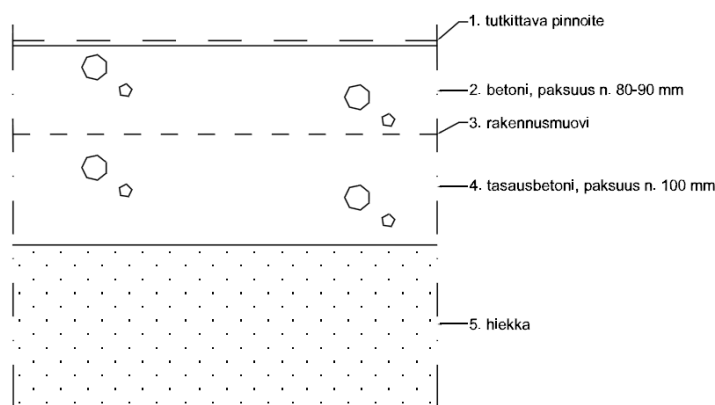
Kellarin alapohjarakenteesta ei ollut tietoa tai saatavilla olevia suunnitelmia ennen tutkimuksen käynnistymistä, vaan rakenne selvitettiin rakenneavauksilla tutkimuskentän valmistelutöiden yhteydessä. Rakenneavaukset tehtiin sekä huoneeseen A että huoneeseen B (Kuva 28). Ison huoneen alapohjarakenne löytyy Kuvasta 29 ja pienen huoneen Kuvasta 30. Rakenteet eroavat lattiatasoitteiden lisäksi toisistaan ”tasausbetonin” paksuuden osalta. Pienen huoneen alapohjarakenne on lähempänä kaksoisbetonilaattaa kuin ison huoneen, jossa tasausbetonin paksuun on noin 20 mm.



Kuva 28 Mittauskenttien sijainti kellarin pohjakuvassa.



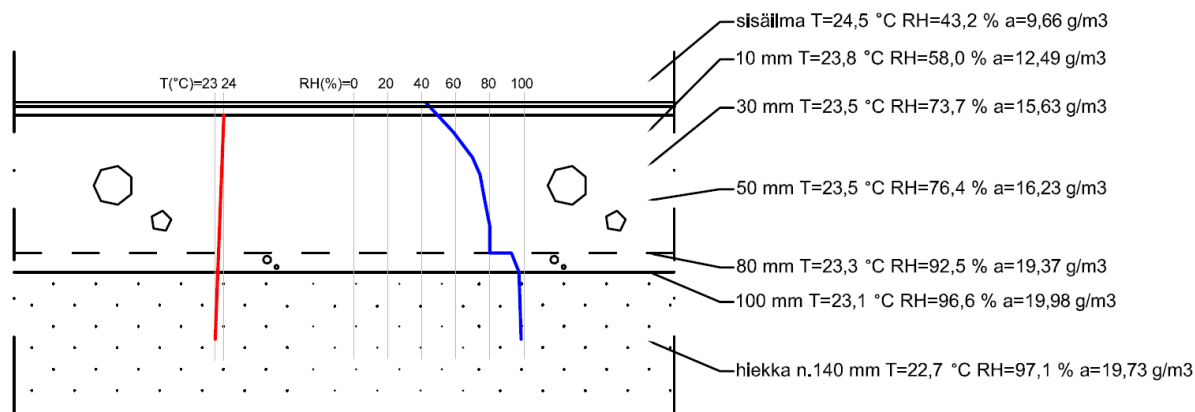
Kuva 29 Huoneen A alapohjarakenne. Tasausbetonia on rakennusmuovin alla huomattavasti vähemmän kuin huoneessa B.



Kuva 30 Huoneen B alapohjarakenne, jossa tasausbetonin paksuus on suurempi kuin päällyslaatan paksuus.

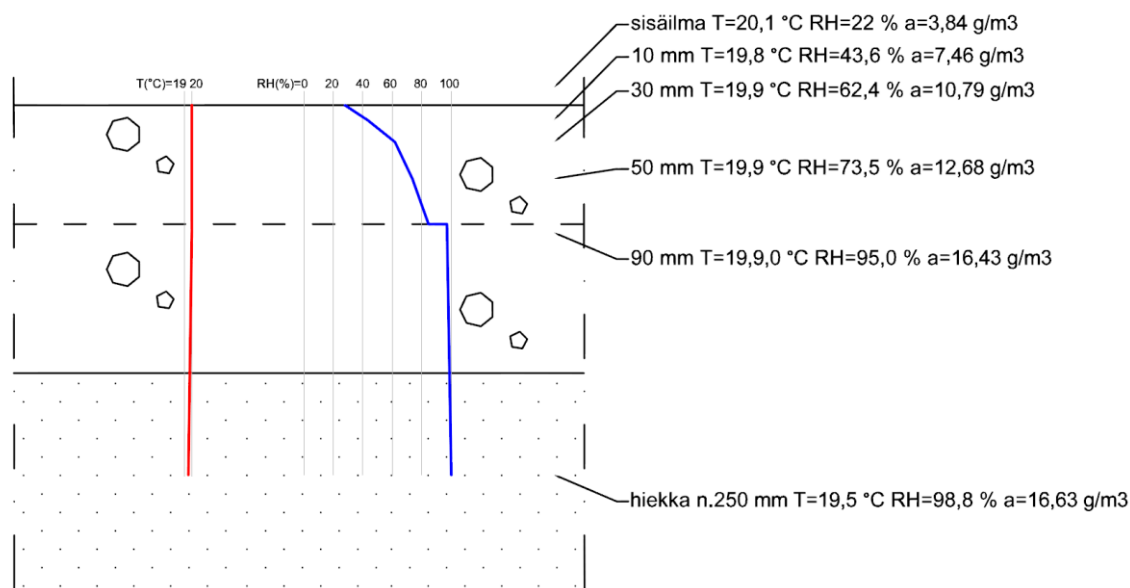
5.2.3 Rakenteen alkuarvot

Huoneen A alapohjarakenteen suhteellinen kosteus ja lämpötila eri syvyyksillä rakenteessa mitattiin porareikämittauksin sekä 19.6.2017 (noin kaksi viikkoa ennen huoneen A ensimmäisiä päällysteitä) että 14.7.2017 (noin kaksi viikkoa ensimmäisten päällysteiden asentamisen jälkeen). Ensimmäisen mittauksen tulokset on esitetty *Kuvassa 31*. Mittausten mukaan rakenteesta oli mittauskertojen välillä (noin neljä viikkoa) ehtinyt haihtua kosteutta noin $1,3 \text{ g/m}^3$, kaikilta eri mittaus­syvyyksiltä. Lisäksi näytepalamittauksella mitattiin huoneen A hienotasoitteen kosteus ja lämpötila (noin yksi viikko ennen huoneen A ensimmäisiä päällysteitä). Hienotasoitteen RH oli 50,1 %, lämpötilassa 21°C .



Kuva 31 Huoneen A alapohjarakenteen lämpötila- ja kosteusjakauma (porareitit mitattu 19.6.2017).

Huoneen B alapohjarakenteen kosteuspitoisuus mitattiin 26.4.2017, eli lähes kaksi kuukautta ennen ensimmäisten päällysteiden asentamista huoneeseen. Mittaustulokset löytyvät alla olevasta kuvasta (Kuva 32).



Kuva 32 Huoneen B alapohjarakenteen lämpötila- ja kosteusjakauma (porareitit mitattu 26.4.2017).

Molemmissa huoneissa lämpötilaero rakenteen eri puolilla oli pieni, suurimmillaan noin yhden celsiusasteen suuruinen. Lähes olematon lämpötilaero johtuu puuttuvan lämmöneristeen lisäksi siitä, että rakenne sijaitsee syväällä maan alla, mistä johtuen ulkoilman lämpötilavaihtelut eivät pääse vaikuttamaan laatan alla olevan maakerroksen lämpötilaan. Huoneessa A hiekkakerroksen ja sisäilman sisältämän kosteuspitoisuuden ero oli mittaushetkellä noin 10 g/m^3 . Huoneessa B vastaava ero oli noin 13 g/m^3 . Näin ollen vesihöyryn diffuusio hiekkakerroksesta sisäilmaa kohti on voimakasta molemmissa huoneissa. Rakenteiden kosteusjakaumassa voidaan huomata rakennusmuovin vaikutus kosteuspitoisuuksiin sen eri puolilla. Molemmissa rakenteissa rakennusmuovi laskee absoluuttista kosteuspitoisuutta noin 3 g/m^3 . Muovi toimii lisäksi rakenteen ainoana kapillaarikatkona lämmöneristeen ja sorakerroksen puuttuessa. Muovin vaikutus on selkeä, vaikkakin muovi oli erittäin ohutta sekä osittain kulunutta ja reikiintynyttä (Kuva 33).



Kuva 33 Valujen välissä ollut rakennusmuovi oli nykypäivän 0,2 mm paksua höyrysulkumuovia ohuempaa. Lisäksi muoviin oli vuosien saatossa tullut reikiä ja se kulunut.

5.2.4 Tutkitut päällysteet

Kosteusmittausten jälkeen mittausruutuja päällystettiin sitä mukaa, kun päällysteitä saatiin hankittua. Ensimmäisenä päällystettiin huone B, johon tasoitteen kuivumisajalla ei ollut merkitystä. Huone B päällystettiin kesäkuun lopussa (20.6.), kun taas viimeinen päällyste huoneeseen A asennettiin vasta elokuun alussa (2.8.). Tiedot päällysteiden asentamisajan kohdista löytyvät alla olevasta taulukosta (*Taulukko 15*).

Tutkittaviksi päällysteiksi valittiin oman mielenkiinnon sekä yrityksen sisäisten että ulkoisten kyselyiden perusteella *Taulukko 15* esitetyt päällysteet. Huoneen A päällysteiksi valittiin tuotteita, joita käytetään runsaasti erityisesti julkisrakennuksissa, kuten kouluissa (*Kuva 34*). Lisäksi huoneeseen A valittiin pinnoitteita, joita käytetään muun muassa teollisuusrakennuksissa. Huoneeseen B valittiin asuinrakennuksissa yleisimmin käytettyjä päällysteitä, kuten laminaatti ja lankkulattia (*Kuva 35*). Osa halutuista päällysteistä, kuten parketti, jouduttiin jättämään pois lähinnä tiukan aikataulun takia. Lisäksi huoneeseen B asennettiin vertailun vuoksi oletusarvoltaan tiivis bitumipohjainen tekstiililaatta. Yksittäiset kuvat päällysteistä löytyvät liitteestä 1.

Taulukko 15 Tutkitut päällysteet.

Ruutu	Asennus-päivä	Materiaali	Valmistaja	Tuote	Tuotteen mitat (mm)	Paksuus (mm)
1	1.7.	kapseloiva epoksi	Nanten	Epoxy Barrier		0,8
2	1.7.	polyuretaanipinnoite	Nanten	HM Bio epoksi (primer) + PU Bio		2
3	1.7.	epoksinpinnoite	Nanten	HM Bio epoksi (primer) + SL Bio		2
4a	1.7.	hiertoepoksinpinnoite	Nanten	HM W epoksi + kvartsihiekkä		3
4b	1.7.	hiertoepoksinpinnoite + lakka	Nanten	HM W epoksi + kvartsihiekkä + HM Bio epoksi (lakka)		3,5
5	1.7.	kelluva vinyyli-lankku + askeläänieriste	Gerflor	silenceULTRA + Virtuo 55 Clic	176 x 1000	5 + 1,8
6	1.7.	irtoasennettava muovimatto	Gerflor	Texline Mat Damier		2,9
7	26.7.	savilattia	Natural Building			15 - 18
8	14.7.	tekstiilimatto + liima	Forbo + Kiilto	Flotex Dakota + Pro Grip		4,3
9	1.7.	enomer lankut + liima	Upofloor + Kiilto	Xpression pienet lankut + M1000 ECO	101,6 x 914,4	2
10	14.7.	kumilaatta + liima	Nora	Norament + nTx		3,6
11	14.7.	linoleumi + liima	Forbo + Kiilto	Marmoleum + Pro Grip		2,5
12	1.7.	muovimatto + liima	Upofloor + Kiilto	Zero + M1000 ECO		2
13	1.7.	kvartsinvinyyli-laatta + liima	Upofloor + Kiilto	Hovi + Pro Grip	300 x 300	2
14	1.7.	muovimatto + liima	Upofloor + Kiilto	Estrad + M1000 ECO		2
15	1.7.	Klinkkeri (saumat-tuna) + kiinnitys-laasti	Hitit (Mapei) + Mapei	Seramik (Ultracolor Plus) + Ultralite S	97 x 97	6 + 6 lasta + sauma 3
16	1.7.	tekstiilimatto + liima	- + Kiilto	- + M1000 ECO		4
17	1.7.	Klinkkeri (saumat-tuna) + kiinnitys-laasti	Imola (Mapei) + Mapei	Ceramica (Ultracolor Plus) + Ultralite S	595 x 595	10,5 + 10 lasta + sauma 3
18	2.8.	kalanyrystö vinyyli-laatta	Gerflor	GTI Max	635 x 635	6
19	20.6.	lankkulattia (lakattu) + askeläänieriste	- + Teknos	Pontattu HLL (Helo Aqua 80) + aaltopahvi	870 (95) + 900	28 + 2
20	20.6.	tekstiililaatta + liima	Modulyss + Kiilto	Alternative 100 + M1000 ECO	900 (500,400) x 900 (500,400)	6,5
21	20.6.	kelluva laminaatti + askeläänieriste	-	laminaatti + solumuovi	870 (193) x 900	8 + 2
22	20.6.	kelluva laminaatti + askeläänieriste	- Karelia	laminaatti + tuplex	870 (193) x 900	8 + 2,5
23	20.6.	korkki	Ideco	korkkilankut	900 (304) x 900	10



Kuva 34 Huoneen A päällysteet.



Kuva 35 Huoneen B päällysteet.

Huoneen A ruudut 1 – 4 pinnoitettiin Nanten teollisuusrakennuksissa käytetyillä epoksi- ja polyuretaanipinnoitteilla. Ensimmäisen ruudun Epoxy Barrier on 2-komponenttinen haitta-aineita kapseloiva epoksinpinnoite, joka levitettiin lattiapintaan kahdessa kerroksessa. Toisen ruudun PU Bio on elastinen 2-komponenttinen liuotteeton polyuretaanilattiamassa, jonka primerina käytettiin HM Bio epoksia. Kolmannen ruudun SL Bio on 2-komponenttinen liuotteeton epoksilattiamassa. Pinnoitteen primerina käytettiin HM Bio epoksia. Neljännen ruudun HM W on 2-komponenttinen vesiohenteinen hartsihiekkaa sisältävä epoksihiertomassa. Neljäs ruutu jaettiin kahteen osaan, joista toisen (4b) pinta lakattiin HM Bio epoksilla, pinnan siivottavuuden ja kulutuksenkeston parantamiseksi. Primerina tai lakkana ruuduissa 2 – 4 käytetty HM Bio epoksi on liuotteeton 2-komponenttinen epoksinpinnoite.

Ruudun viisi Virtuo 55 Clic on lukkopontillinen kelluva vinyylilankkulattia, jonka alle asennettiin tekstiilikuitukerroksellinen askeläänieriste silenceULTRA. Yksi lankku on leveydeltään 176 mm. Ruudun kuusi Texline on irtoasennettava kerroksellinen muovimatto asuinkäyttöön. Ruutujen viisi ja kuusi tuotteet ovat Gerflorin valmistamia.

Ruudun seitsemän saviilattia on The Natural Building Company:n valmistama tuote, joka tehdään useammassa eri kerroksessa. Ensimmäinen, noin 15 mm paksuinen kerros on punaista/ruskeaa savea, jonka seassa on hiekkaa (raekoko 0 – 2 mm). Seuraavat kolme alle 1 mm paksuista kerrosta ovat valkoista savea, jonka seassa on kaoliinia, hienoa hiekkaa (raekoko 0 – 0,5 mm), selluloosaliimaa ja järvikaislasta tehtyjä kuituja. Ylimmän kerroksen pinta on öljytty kolmeen kertaan pellavaöljyllä, minkä jälkeen pinta on vielä vahattu karnaubavahalla.

Ruudussa kahdeksan on Forbon Flotex Dakota tekstiilimatto, joka on liimattu alustaansa Kiillon Pro Grip liimalla. Flotexin pintakerroksen nylon-kuidut on liimattu kiinni lasikuitukankaaseen, jonka alla on lasikuitulujitteella vahvistettu erikoisvinyylikerros. Pro Grip liima on vesiohenteinen tarraliima, jonka pääsideaineena on akrylaattisekapolymeeri.

Ruudussa yhdeksän on Upofloorin valmistamat pienet Xpression lankut (lankkujen leveys 101,6 mm). Xpression on PVC-vapaa ja ftalaatiton enomer-päällyste, joka on liimattu alustaansa Kiillon M1000 ECO liimalla. M1000 ECO on vesiohenteinen liima, jonka pääsideaineena on akrylaattisekapolymeeri.

Ruudussa kymmenen on Noraplanin Norament kumilaatta, joka on liimattu alustaansa tuotteen omalla nTx liimapinnalla.

Ruudussa 11 on Forbon Marmoleum linoleumipäällyste. Marmoleum on liimattu alustaansa Kiillon Pro Grip tarraliimalla.

Ruuduissa 12 – 14 on Upofloorin valmistamia tuotteita: Ruudussa 12 on PVC-vapaa ja ftalaatiton Zero muovimatto ja liimana Kiillon M1000 ECO. Ruudussa 13 on 300 x 300 mm kvartsivinyylilaatta Hovi ja liimana Kiillon Pro Grip. Ruudussa 14 on julkisiin tiloihin tarkoitettu homogeeninen PVC-muovimatto Estrad ja liimana Kiillon M1000 ECO.

Ruudussa 15 on 97 x 97 mm klinkkerit (Hitit), jotka on saumattu Mapein Ultracolor Plus saumauslaastilla (sauman leveys 3 mm) ja kiinnitetty alustaansa Mapein Ultralite S kiinnitys-laastilla (laastikamman hammastus 6 mm).

Ruudussa 16 on tuntemattoman valmistajan tavallisesti erilaisilla messuilla ja näyttelyillä lattiapäällysteenä käytetty tekstiilimatto liimattuna alustaansa Kiillon M1000 ECO liimalla. Forbon Flotexiin verrattuna tekstiilimaton tekstiilikuidut ovat huomattavasti harvemmassa. Lisäksi tekstiilit on liimattu suoraan pohjakankaaseen ilman alempia vinyyli-/bitumikerroksia.

Ruudussa 17 on 595 x 595 mm klinkkerit (Imola), jotka on saumattu Mapein Ultracolor Plus saumauslaastilla (sauman leveys 3 mm) ja kiinnitetty alustaansa Mapein Ultralite S kiinnitys-laastilla (laastikamman hammastus 10 mm).

Huoneen A viimeisessä ruudussa numero 18 on Gerflorin irtoasennettavat kalanpyrstövinyyllilaatat GTI Max. Yhden laatan koko on 635 x 635 mm.

Huoneen B ensimmäisessä ruudussa numero 19 on 95 x 28 mm pontattu lankkulattia (HLL). Lankut on liimattu pontista toisiinsa Eri keeper plus liimalla ja lankkulattian pinta on lakattu kahteen kertaan Teknoksen Helo Aqua 80 lakalla. Lankkulattian ja betonin välissä on askeläänieristeenä aaltopahvi.

Ruudussa 20 on Modulyss Alternative 100 tekstiililaatta. Yhden laatan koko 500 x 500 mm. Laatan pintakerroksessa on lateksiin kiinnitettyjä nylon-kuituja. Lateksin alapuolella on bitumikerros ja alimpana polyesterihuopa. Laatat on liimattu alustaansa Kiillon M1000 ECO liimalla.

Ruudussa 21 ja 22 on perinteiset kelluvana asennetut lukkopontilliset laminaattilankut. Yhden laminaattilankun leveys on 193 mm. Ruudussa 21 laminaatin alla on solumuovinen askeläänieriste. Ruudussa 22 askeläänieristeenä on Tuplex.

Ruudussa 23 on kelluvana asennetut korkkilankut. Korkkilankun yläpinnassa on 3 mm paksuinen korkkikerros sekä lakkakerros. Lankun runkona toimii 6,8 mm paksu HDF-levy ja alimpana kerroksena 1,2 mm paksuinen askeläänieristyskorkki. Yhden korkkilankun leveys on 304 mm.

5.2.5 Käytetyt mittausmenetelmät

Tässä tutkimuksessa alapohjarakenteen lämpötilan ja kosteuspitoisuuden havainnoinnissa käytettiin neljää eri mittausmenetelmää: Porareikä-, viilto-, näytepala- ja loggaavamittaus. Eri mittausmenetelmillä saatuja tuloksia vertailtiin keskenään parhaimman mittatarkkuuden saavuttamiseksi. Tutkimuksessa käytettyihin mittausmenetelmiin sekä menetelmien välisten tulosten vertailuun perehdytään tarkemmin FCG:n Harri Nymanin opinnäytetyössä.

Alapohjarakenteen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin pääosin porareikämenetelmällä. Huoneen A hienotasoitteen lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin lisäksi näytepalamittauksella, tasoitteen päällystettävyyden määrittelemiseksi. Päällysteen ja tasoite-/betonikerroksen rajapinnan lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mitattiin sekä porareikä- että viiltomittausmenetelmällä päällysteestä riippuen. Lisäksi päällysteen ja tasoitteen välisen rajapinnan lämpö- ja kosteuspitoisuuden määrittämistä varten tutkimuksessa oli käytössä yhteensä kuusi mittausdataa tallentavaa anturia. Yksi näistä antureista jätettiin mittaamaan sisäilman lämpötilaa ja kosteutta, ja muut viisi anturia upotettiin vaakatasossa päällysteen alle tasoitteen/betonin pintaan. Porareikä/viiltomittauksia pyrittiin suorittamaan noin 2 viikon välein.

5.3 Simulaatio

Kenttämittausten lisäksi molemmista tutkituista rakenteista luotiin 2D-tietomalli, josta saatuja tuloksia vertailtiin kenttämittauksista saatuihin tuloksiin. Malli luotiin COMSOL Multiphysics –ohjelmalla, jossa lisäosana on Heat Transfer Module. Malli luotiin kaksidimensioisena, jotta joidenkin päällysteiden kohdalla pystyttiin paremmin havainnoimaan mm. päällysteen saumojen rakennetta kuivattavaa vaikutusta. Tässä tutkimuksessa tehdyt tarkastelut suoritettiin epästationäärisinä, ajasta riippuvina tarkasteluina.

COMSOL Multiphysics –ohjelma on numeeriseen ratkaisumenetelmään perustuva mallinnusohjelma, joka on kehitetty simuloimaan fysiikkapohjaisia ongelmia. Heat Transfer Module on ohjelmassa käytettävä lisäosa, jonka sisäänrakennetut yhtälöt ottavat huomioon yhdistetyn lämmön ja kosteuden varastoitumisen sekä siirtyminen rakennusmateriaaleissa. Ohjelma huomioi laskennassa lämmön siirtymisen johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä sekä latenttilämmön vaikutuksen että lämmön varastoitumisen materiaaliin. Kosteuteen liittyvistä ilmiöistä ohjelma huomioi kosteudensiirtymisen konvektiolla, diffuusiolla ja kapillaarisesti sekä kosteuden varastoitumisen materiaaliin.

5.3.1 Alku- ja raja-arvot

Alku- ja raja-arvoina mallinnuksessa käytettiin sekä mittauksin saatuja tuloksia että kirjallisuudessa määritettyjä arvoja.

Sisäilma

Sisäilman lämpötilana laskennassa käytettiin vakiolämpötilaa ($T = 22\text{ °C}$), mikä oli sisäilmasta noin kahden viikon välein mitattujen lämpötilojen keskiarvo. Sisäilman kosteuspitoisuuden arvot puolestaan määritettiin Lahden Launeen sääasemalta saadun mittausdatan perusteella. Ilmatieteen laitokselta saatiin tunnin välein mitatut ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot koko tutkimuksen ajalta. Arvoista laskettiin ulkoilman sisältämän absoluuttisen kosteuspitoisuuden keskiarvot jokaiselle päivällä. Saatu vesihöyrypitoisuus muutettiin sisäilman vesihöyrypitoisuudeksi lisäämällä siihen sisäilman kosteuslisä ($\Delta v = 1\text{ g/m}^3$). Sisäilman vesihöyrypitoisuus tutkimusajalta on esitetty alla olevassa kuvassa (Kuva 36). Kosteuslisän suuruus on pienempi kuin luvussa 3.2 määritetyt suositusarvot, koska tiloissa ei ole ihmisten toiminnasta johtuvaa lisäkosteudentuottoa. Vaikka tasoitteiden kuivumisesta aiheutui, erityisesti tutkimuksen alkuvaiheessa, lisäkosteutta sisäilmaan, sisäilmasta tarkistusmittauksilla saadut kosteuspitoisuudet korreloivat hyvin säädatasta määritettyjen arvojen kanssa.



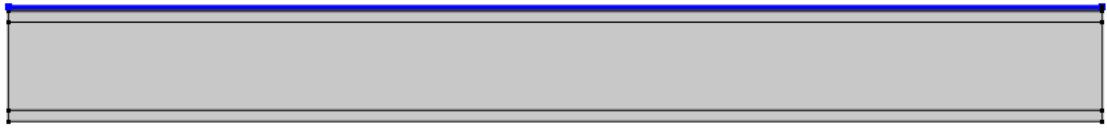
Kuva 36 Sisäilman vesihöyrypitoisuus tutkimuksen aikana. Laskettu Ilmatieteen laitoksen Lahden Launeen sääasemalta keräämän säädatan perusteella.

Rakenteen yläpinta

Rakenteen yläpinnan (Kuva 37) ja sisäilman välillä tapahtuu jatkuvasti lämmön ja kosteuden siirtymistä. Lämpöä siirtyy rakenteen läpi pääosin johtumalla, mutta rakenteen yläpinnan ja sisäilman välillä lämpöä siirtyy säteilemällä ja konvektion avulla. COMSOL –mallissa pinnalta ympäristöön tai ympäristöstä pintaan siirtyvän lämpömäärän suuruutta kuvattiin konvektiivisen lämmönsiirron yhtälöllä (ks. luku 2.1.3 Konvektio, yhtälö 14). Rakenteen yläpinnan yhdistetyn lämmönsiirtokertoimen (konvektio + säteily) arvoksi annettiin $h = 8\text{ W/m}^2\text{K}$. (Künzel 1995, s. 30)

Kosteutta siirtyy tutkitun rakenteen läpi pääosin diffuusiolla, ja korkeammissa kosteuspitoisuuksissa mahdollisesti myös kapillaarisesti, mutta rakenteen yläpinnan ja ympäröivän sisäilman välillä kosteutta siirtyy lähes yksinomaan konvektiovirtauksen välityksellä. COMSOL –mallissa kosteusvirran suuruutta rakenteen yläpinnan ja sisäilman välillä kuvattiin

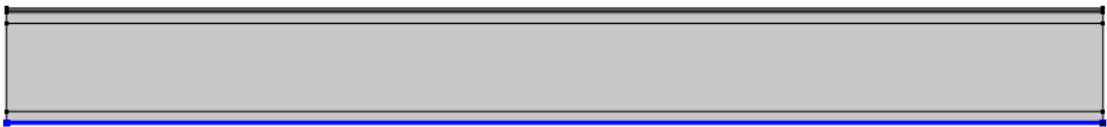
konvektiivisen kosteusvirran yhtälöllä (ks. luku 2.3.4 Kosteuskonvektio, yhtälö 36). Rakenteen yläpinnan konvektiivisen kosteudensiirtokertoimen arvoksi annettiin $\beta = 2,5 \cdot 10^{-8}$ s/m. (Künzel 1995, s. 31)



Kuva 37 Rakenteen yläpinnan (sininen) ja rakenteen yläpuolisen sisäilman välillä lämpöä siirtyy säteilemällä ja konvektion välityksellä. Kosteutta rakenteen ja sisäilman välillä siirtyy lähes yksinomaan konvektiovirtaus-ten mukana.

Rakenteen alapuolinen täyttökerros

Lämmön siirtymisessä rakenteen alapuolinen täyttökerros mallinnettiin vakiolämpötilana rakenteen alapinnassa (Kuva 38). Näin ollen alapinnan lämpötila pysyi vakiona koko laskenta-ajan. Täyttökerroksesta tutkimuksen alkaessa sekä huoneesta A että huoneesta B mitattu lämpötila oli maksimissaan noin yhden celsiusasteen alempi kuin sisäilman lämpötila. Näin ollen täyttökerroksen lämpötilana mallissa käytettiin kenttämittauksista saatujen sisäilman lämpötila-arvojen keskiarvoa, josta vähennettiin 1 °C: $T = 21$ °C. Kosteuden siirtymisessä täyttökerros mallinnettiin vakiokosteuspitoisuutena betonilaatan alareunassa. Huoneessa A täyttökerroksen suhteellisenä kosteutena laskennassa käytettiin arvoa $RH = 98$ %. Huoneessa B puolestaan arvoa $RH = 91$ %. Valitut arvot vastaavat suurin piirtein 21 °C lämpötilaan muutettuja, kenttämittauksista täyttökerrokselle saatuja arvoja.

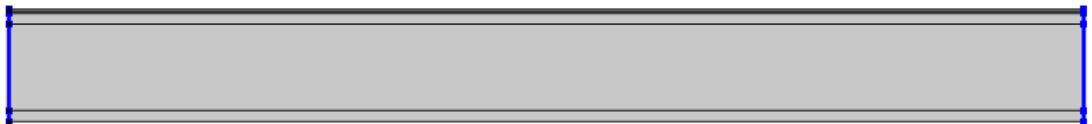


Kuva 38 Täyttökerros mallinnettiin vakiolämpötilana ja -kosteuspitoisuutena rakenteen alareunassa (sininen).

Mallin reuna-alueet

Mallin reuna-alueet kuviteltiin laskennassa täysin eristetyiksi (Kuva 39), jolloin reuna-alueiden yli ei lämpöä eikä kosteutta siirry. Näin ollen voidaan todeta, että reuna-alueen eri puolilla tulee lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden olla yhtä suuria. Toisin sanoen lämpötila- ja kosteusgradientin reuna-alueen yli tulee olla nolla:

$$-n \cdot g = -n \cdot q = 0 \quad (41)$$



Kuva 39 Rakenteen reuna-alueet (sininen) merkitään laskennassa täysin eristetyiksi, jolloin lämpö- ja kosteusgradientin suuruus reuna-alueen yli on nolla.

5.3.2 Materiaaliominaisuudet

Toimiakseen COMSOL Multiphysics –ohjelman Heat Transfer Module vaati seuraavat materiaaliominaisuudet:

- tiheys
- ominaislämpökapasiteetti
- lämmönjohtavuus
- vesipitoisuus
- kapillaarinen kosteusdiffusiviteetti
- vesihöyrynläpäisevyys.

Materiaaliominaisuuksia tutkimusta varten kerättiin mm. materiaalivalmistajien tuoteselosteista ja olemassa olevista tutkimuksista. Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet löytyvät liitteestä 2. Materiaaliominaisuuksissa, erityisesti materiaalien vesihöyrynläpäisevyydessä, oli suuria eroavaisuuksia lähteestä riippuen. Päälysteille lähteiden pohjalta annettuja vesihöyrynläpäisevyyden arvoja jouduttiin osalla päälysteistä muokkaamaan, jotta malli saatiin paremmin korreloimaan kenttämittausten kanssa.

Osaan materiaaliarvoista vaikuttaa huomattavasti esimerkiksi materiaalin huokosten suhteellinen kosteus. Lämpötilan vaikutusta materiaaliarvoihin ei laskennassa huomioitu, koska lämpötilan vaikutus arvoihin on vähäinen ja rakenteen lämpötila oli lähes vakio koko tutkimuksen ajan.

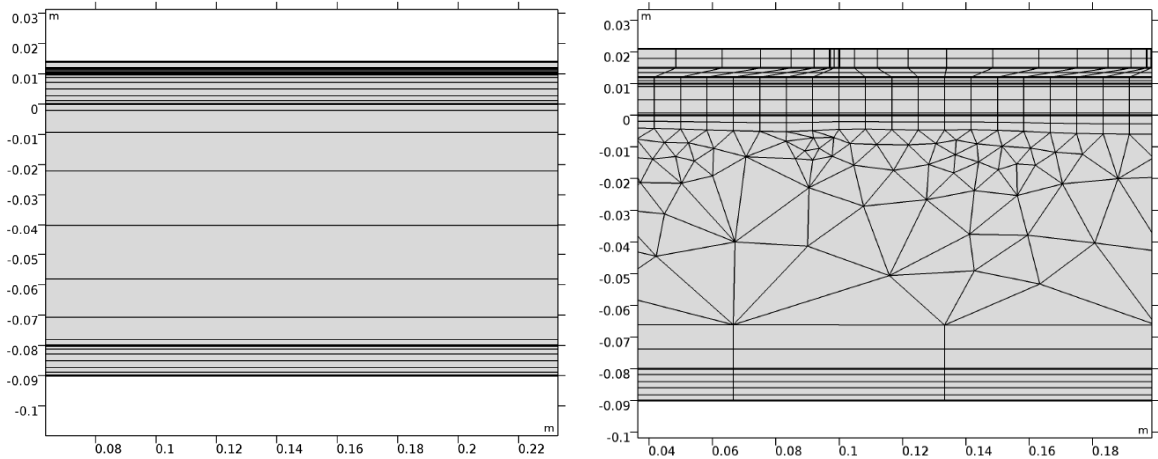
Ohuita materiaalikerroksia, kuten rakennusmuovia, lakka- sekä liimakerroksia, tarkasteltiin mallissa materiaalikerrosten välisenä pintavastuksena. Ohuille kerroksille määritettiin lämmön siirtymisen puolella muita materiaaleja vastaavat ominaisuudet, mutta kosteuden siirtymisen puolella materiaali mallinnettiin ohuena höyrynsulkukalvona, jolloin sille määritettiin S_d -arvo.

5.3.3 Laskentaverkko

COMSOL –ohjelmassa mallinnettava rakenne jaetaan geometrialtaan yksinkertaisiin elementteihin, joiden sisällä lämpötila- ja kosteusarvot pysyvät vakioina. Lämpötilan ja kosteusarvojen muutokset tapahtuvat ainoastaan elementtien rajapinnoilla. Kaikki rakenteen sisällä olevat elementit muodostavat yhdessä niin sanotun laskentaverkon.

Laskentaverkkoa tihennettiin, eli elementtien kokoa pienennettiin rakenteen sisällä materiaalien rajapinnoilla, joilla olosuhteiden muutokset ovat suurimpia. Laskentaverkon tihentäminen lisää laskennan tarkkuutta, mutta samanaikaisesti vaikeuttaa laskentaa ja näin ollen pidentää laskenta-aikaa. Tietyn pisteen jälkeen verkon tihentämisellä ei kuitenkaan ole enää merkitystä mallin tarkkuuteen. Näin ollen malliin pyrittiin rakentamaan verkko, jonka avulla laskenta-aika pysyy lyhyenä ilman, että laskennan tarkkuus kärsii. Alla olevassa kuvassa (Kuva 40) on esimerkki tutkittua rakennetta varten luodusta laskentaverkosta. Vasemmanpuoleinen rakenne on jaettu elementteihin ainoastaan pystysuunnassa. Pelkkää pystysuuntaista jakoa voitiin käyttää pinnoitteilla sekä saumattomilla päälysteillä, joilla olosuhtemuutoksia tapahtui ainoastaan pystysuunnassa. Oikeanpuoleinen saumallisella päälysteillä

päällystetty rakenne puolestaan vaati rakenteen jakamisen elementteihin myös vaakasuunnassa. Päällysteillä, joiden saumat eivät olleet täysin tiiviitä, tai joilla saumamateriaalin ominaisuudet poikkesivat päällysteen ominaisuuksista, tapahtui olosuhdemuutoksia myös vaakasuunnassa.



Kuva 40 Esimerkki laskentaverkosta. Vasemmanpuoleisessa kuvassa rakenne jaettu elementteihin ainoastaan korkeussuunnassa. Oikeanpuoleisessa kuvassa jako tehty myös leveyssuunnassa.

5.3.4 Laskenta-aika

Huoneen A laskenta aloitettiin 19.6.2017, eli päivästä, jolloin rakenteen lämpötila ja kosteuspitoisuus mitattiin ensimmäisen kerran. Laskenta käynnistettiin aluksi ilman päällysteitä tilanteessa, jossa rakenteen pintaan oli asennettu lattiatasotiteet. Laskentaa rullattiin eteenpäin aina siihen hetkeen saakka, milloin päällyste asennettiin. Tämä hetki vaihteli päällyste-kohtaisesti. Tämän jälkeen laskentaa jatkettiin rakenne päällystettynä viimeiseen tätä tutkimusta varten suoritettuun mittauspäivään asti (27.10.2017).

Huoneen B laskenta aloitettiin 26.4.2017, eli päivästä, jolloin rakenteen lämpötila ja kosteuspitoisuus mitattiin ensimmäisen kerran. Laskentaa rullattiin eteenpäin ilman päällysteitä aina 20.6.2017 saakka, eli päivään, jolloin huoneen kaikki päällysteet asennettiin. Tämän jälkeen laskentaa jatkettiin rakenne päällystettynä viimeiseen tätä tutkimusta varten suoritettuun mittauspäivään asti (27.10.2017).

6 TULOKSET

Tässä luvussa on esitetty simulaatioista ja kenttämittauksista saadut tulokset. Tulokset on esitetty xy-kaavioissa siten, että x-akselilla on aika vuorokausina ja y-akselilla vesihöyrypitoisuus päällysteen alla (g/m^3). Aika-akseli on asetettu alkamaan hetkestä, jolloin tarkasteltava päällyste on asennettu. Vesihöyrypitoisuus valittiin tarkasteltavaksi muuttujaksi suhteellisen kosteuden sijaan, koska tällöin pystyttiin jättämään lämpötilan vaihtelut kuvaajista pois. Tuloksista saatiin lisäksi helpommin vertailtavia keskenään.

Simulaatioista saadut tulokset on esitetty yhtenäisellä viivalla, kun taas kenttämittauksista saadut tulokset on esitetty pisteillä erilaisia geometrioita apuna käyttäen. Kaikissa kuvaajissa on lisäksi esitetty sisäilman vesihöyrypitoisuus, koska sillä oli suuri vaikutus erityisesti läpäisevimpien päällysteiden alapuoliseen vesihöyrypitoisuuteen.

Tulokset on jaettu yhteensä yhdeksään eri kuvaajaan, jotta kuvaajat pysyivät selkeinä ja tulokset helposti tulkittavina. Eri huoneiden (A ja B) päällysteitä ei kuvaajissa vertailla keskenään, koska huoneiden poikkeavasta rakenteesta johtuen, tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Lisäksi samaan kuvaajan on valittu vertailtavaksi vain päällysteen kanssa muita samoihin aikoihin asennettuja päällysteitä, jottei rakenteen epätasainen kuivuminen heikentäisi tulosten vertailtavuutta. Liitteestä 3 löytyy kuvaajat, joissa kaikki huoneen A sekä kaikki huoneen B kenttämittaustulokset ovat samassa xy-kaaviossa.

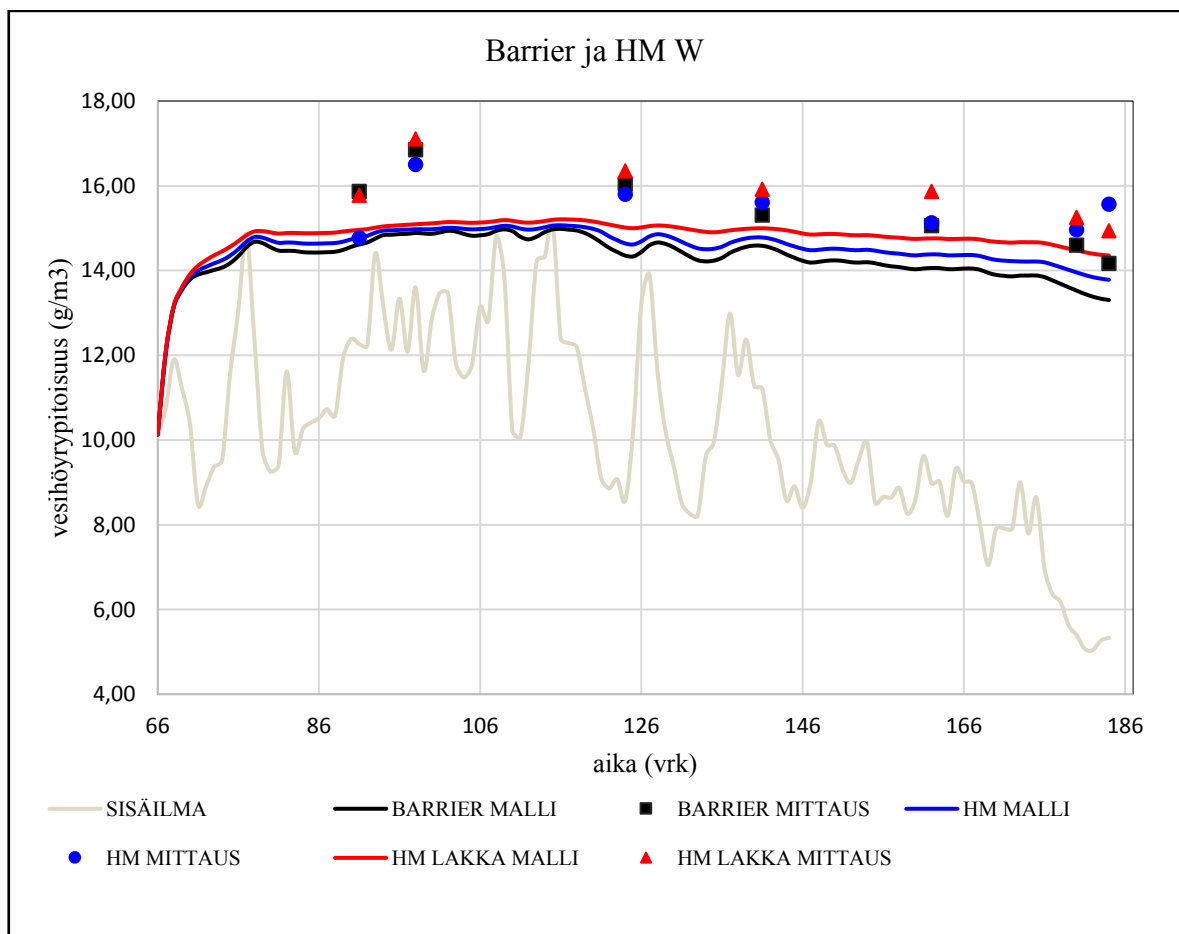
Lähes kaikissa mittaustuloksista nähdään selkeä piikki vesihöyrypitoisuudessa 98 vuorokauden kohdalla. Poikkeuksellisen korkea vesihöyrypitoisuus johtuu todennäköisesti siitä, että lämpötila kyseisellä mittaushetkellä oli lähes asteen verran keskimääräistä mittaustilaa korkeampi.

Huoneen B vesihöyrypitoisuudet ovat huoneen A pitoisuuksia huomattavasti alempia. Tämä johtuu todennäköisesti rakennetta kastelevien tasoitekerrosten puuttumisesta sekä huoneen B paksummasta rakenteesta. Paksummasta rakenteesta johtuen maasta rakenteeseen tulevan diffuusiiovirran vaikutus on hitaampaa, mistä johtuen vesihöyrypitoisuus päällysteen alla nousee hitaammin kuin huoneessa A.

6.1.1 Huoneen A päällysteet

Ensimmäisessä kuvaajassa (*Kuva 41*) on esitetty tulokset Epoxy Barrierin ja HM W hier-toepoksinnoitteen alla. Tuloksista nähdään, että simulaatiota ei saada täysin korreloimaan mittaustulosten kanssa, koska epoksinnoitteiden alapuolinen vesihöyrypitoisuus oli lähtö-tilanteessa arvioitua korkeampi. Mittaustulokset kuitenkin seuraavat simulaatiokäyrien muotoa ja kaikilla pinnoitteilla vesihöyrypitoisuus laskee mitä pidemmälle tarkastelu etenee. Pinnoitteiden alapuolisen vesihöyrypitoisuuden laskemiseen vaikuttaa pääasiassa sisäilman vesihöyrypitoisuuden aleneminen tarkasteluajan loppua kohti mentäessä. Pintalakkaamattoman HM W pinnoitteen alapuolinen vesihöyrypitoisuus pysyy koko tarkasteluajan hieman HM Bio epoksilla lakatun HM W pinnoitteen alapuolista vesihöyrypitoisuutta matalampana, lukuun ottamatta viimeistä mittaustulosta, jossa lakkaamattoman pinnoitteen alapuolinen vesihöyrypitoisuus oli korkeampi kuin lakatulla pinnoitteella. Syy tähän voi olla esimerkiksi mittausvirhe tai paikalliset olosuhdevaihtelut mittauskentällä.

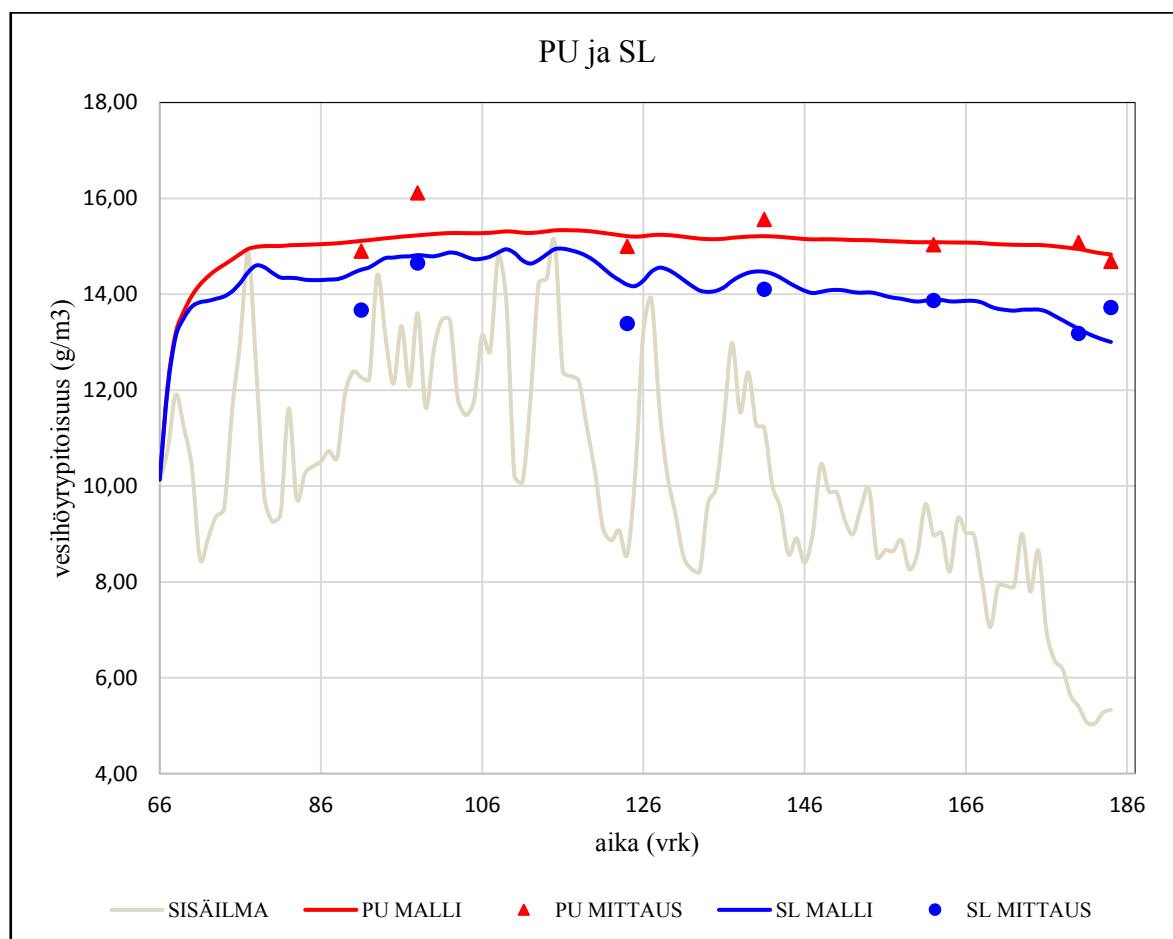
Mittaustulosten perusteella kaikki kolme tarkasteltua epoksinnoitetta ovat varsin tiiviitä ja kuuluvat tässä tutkimuksessa mukana olleista päällysteistä tiiveimpien joukkoon. Tulosten perusteella HM W:n vesihöyrynvastus on isompi kuin Barrierilla, vaikka ennen tutkimusta Barrierin vesihöyrynvastuksen oletettiin olevan selvästi isompi. Vesihöyrynläpäisevyydeltään HM W on kuitenkin läpäisevämpi, koska pinnoitteiden välinen paksuusero on lähes nelinkertainen (HM W paksumpi).



Kuva 41 Vesihöyrypitoisuus Epoxy Barrier pinnoitteen ja HM W hier-toepoksinnoitteen alla ajan funktiona.

Toisessa kuvaajassa (Kuva 42) on esitetty tulokset PU polyuretaanipinnoitteen ja SL epoksinpinnoitteen alla. SL epoksinpinnoitteen alta mitatut vesihöyrypitoisuudet ovat yli 1 g/m³ verran matalampia lähes koko mittausajan. Syynä kosteuseroon saattaa tosin olla mittauksen aikainen lämpötila, joka oli SL:llä keskimäärin noin 0,8 °C alempi. Molempien pinnoitteiden alapuolinen kosteuspitoisuus pysyy varsin korkeana mittausajan loppuun asti, joskin laskee mittauksen edetessä sisäilman kosteuspitoisuuden laskiessa.

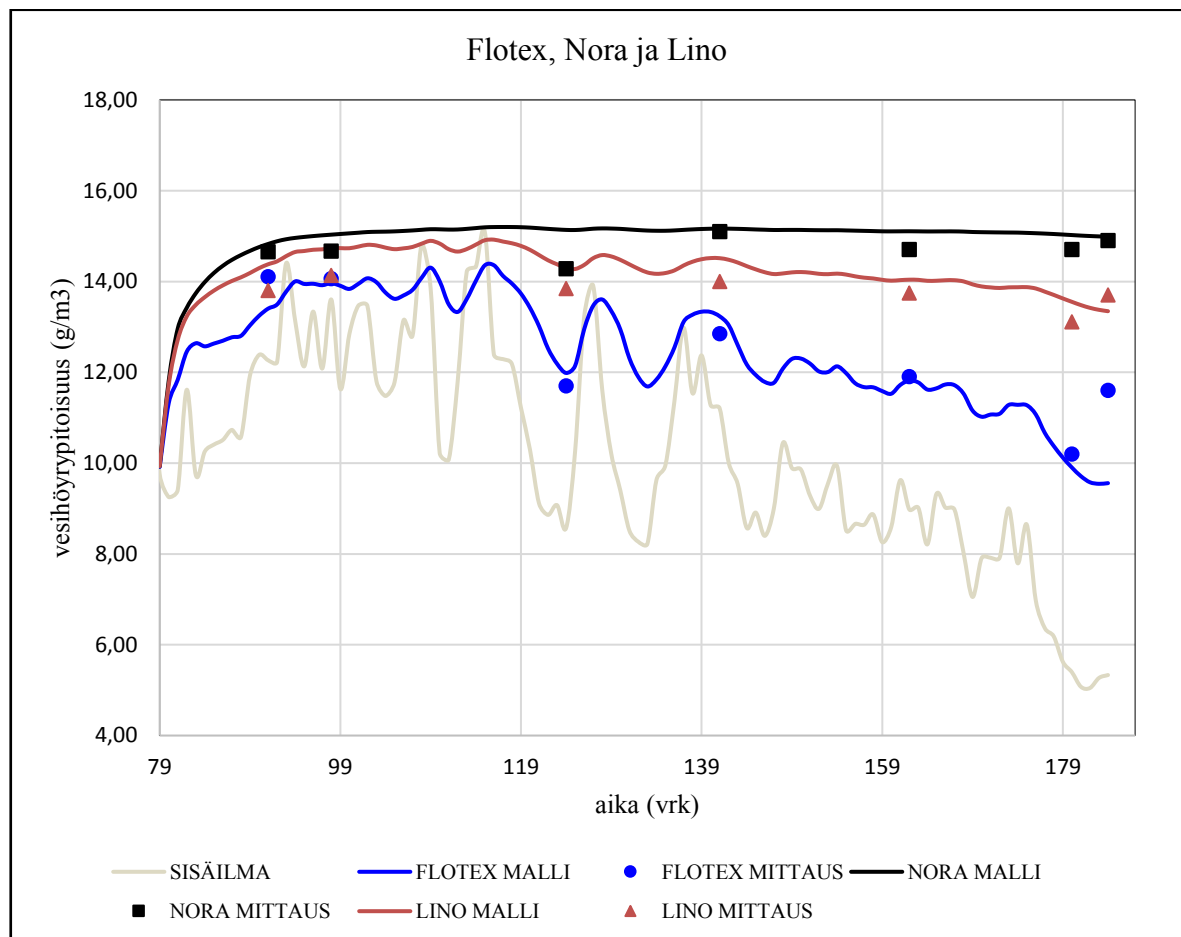
Tulosten perusteella polyuretaanimassa vaikuttaa saman paksuista epoksimassaa tiiviimmältä. PU:n mittaustulokset ovat samaa luokkaa kuin Barrierilla ja HM W:llä, joten myös PU kuuluu tiiviiden päällysteiden joukkoon. SL vaikuttaa epoksi-/polyuretaanipinnoitteista kaikkein läpäisevimmältä, joskin alempi mittauslämpötila tulee ottaa tulosten tulkinnassa huomioon. Tästä syystä pinnoite sijoitetaan myös tiiviiden päällysteiden joukkoon, vaikkakin tietomallissa käytetyn vesihöyrynläpäisevyysarvon perusteella pinnoite kuuluisi kohtalaisesti kosteutta läpäisevien päällysteiden joukkoon.



Kuva 42 Vesihöyrypitoisuus PU polyuretaanipinnoitteen ja SL epoksinpinnoitteen alla ajan funktiona.

Kolmannessa kuvaajassa (*Kuva 43*) on esitetty tulokset Flotex tekstiilimaton, Norament kumilaatan ja Marmoleum linoleumin alla. Tuloksien perusteella on havaittavissa selviä eroja vesihöyrypitoisuuksissa kyseisten päällysteiden välillä. Noramentin alapuolinen kosteuspiitoisuus pysyy korkeana noin 15 g/m³ koko mittausajan, eikä siihen sisäilman kosteuspiitoisuuden alenemisella olla juuri vaikutusta. Marmoleumin alapuolisessa vesihöyrypitoisuudessa on tulosten perusteella havaittavista selkeää laskua mittausajan loppua kohti mentäessä, joskin vesihöyrypitoisuus pysyy silti varsin korkeana. Flotexin alapuolinen vesihöyrypitoisuus on mittausten alkuvaiheessa samaa luokkaa kuin Noramentilla ja Marmoleumilla, mutta laskee nopeasti lähelle sisäilman kosteuspiitoisuutta ja seuraa sitä mittausajan loppuun asti, viimeistä mittaustulosta lukuun ottamatta.

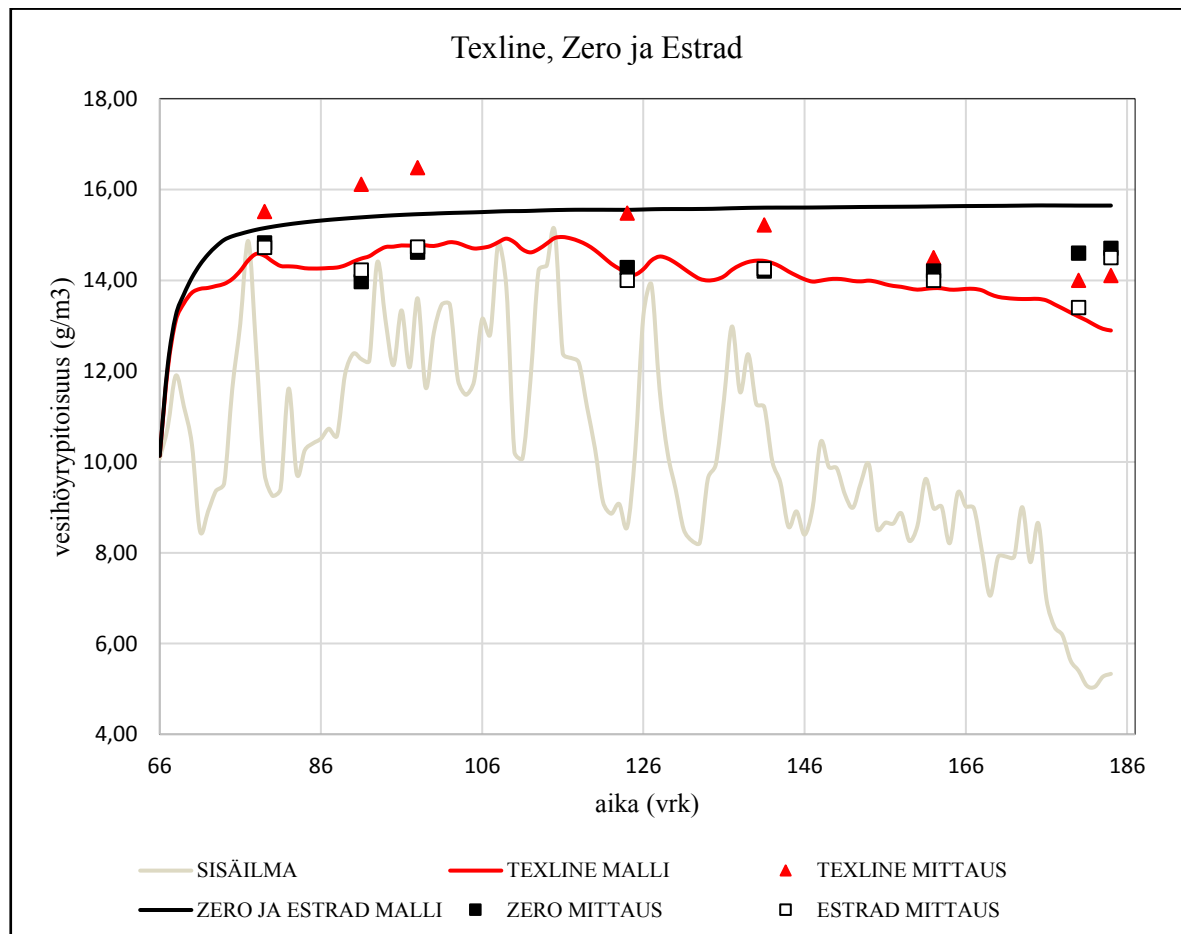
Tulosten perusteella kumilaatta on alla olevan kuvaajan päällysteistä tiivein, kuten alun perin oletettiin. Vinyylipohjainen Flotex –tekstiilimatto puolestaan läpäisee vesihöyryä tulosten perusteella oletettua paremmin. Linoleumin läpäisevyys on tulosten perusteella samaa luokkaa SL epoksinnoituksen kanssa, joskin mittaustilasto oli SL:än poikkeavan alhaista mittaustilastoa korkeampi. Tästä syystä linoleumi kuuluu kohtalaisesti kosteutta läpäiseviin päällysteisiin.



Kuva 43 Vesihöyrypitoisuus Norament kumilaatan, Flotex tekstiilimaton ja Marmoleum linoleumin alla ajan funktiona.

Neljännessä kuvaajassa (*Kuva 44*) on esitetty tulokset kolmen eri muovimaton alla. Estrad ja Zero ovat homogeenisia julkisen tilan muovimattoja, joilla molemmilla on suurin piirtein samat vesihöyryn läpäisevyyden arvot. Texline puolestaan on kerroksellinen asuinkäyttöön tarkoitettu muovimatto, jonka läpäisevyys on oletusarvoltaan homogeenisia mattoja suurempi. Lähtötilanteen vesihöyrypitoisuus on Texlinin alla korkeampi, mutta tarkastelujakson edetessä vesihöyrypitoisuus Zeron ja Estradin alla nousee Texlinin alapuolista vesihöyrypitoisuutta korkeammaksi. Zeron ja Estradin kaltaisten tiiviiden pinnoitteiden alapuoliseen vesihöyrypitoisuuteen ei sisäilman vesihöyrypitoisuudella vaikuta olevan merkitystä. Kenttämittauksia jatkettaessa on todennäköistä, että vesihöyrypitoisuus Zeron ja Estradin alla nousee entisestään. Texlinen alapuolinen vesihöyrypitoisuus pysynee myöskin verrattain korkeana, joskin todennäköisesti matalampana kuin Zerolla ja Estradilla. Vaikka Texlinen alapuolinen vesihöyrypitoisuus on mittausten alkupäässä poikkeuksellisen korkea, laskee se mittausten loppua kohti selvästi.

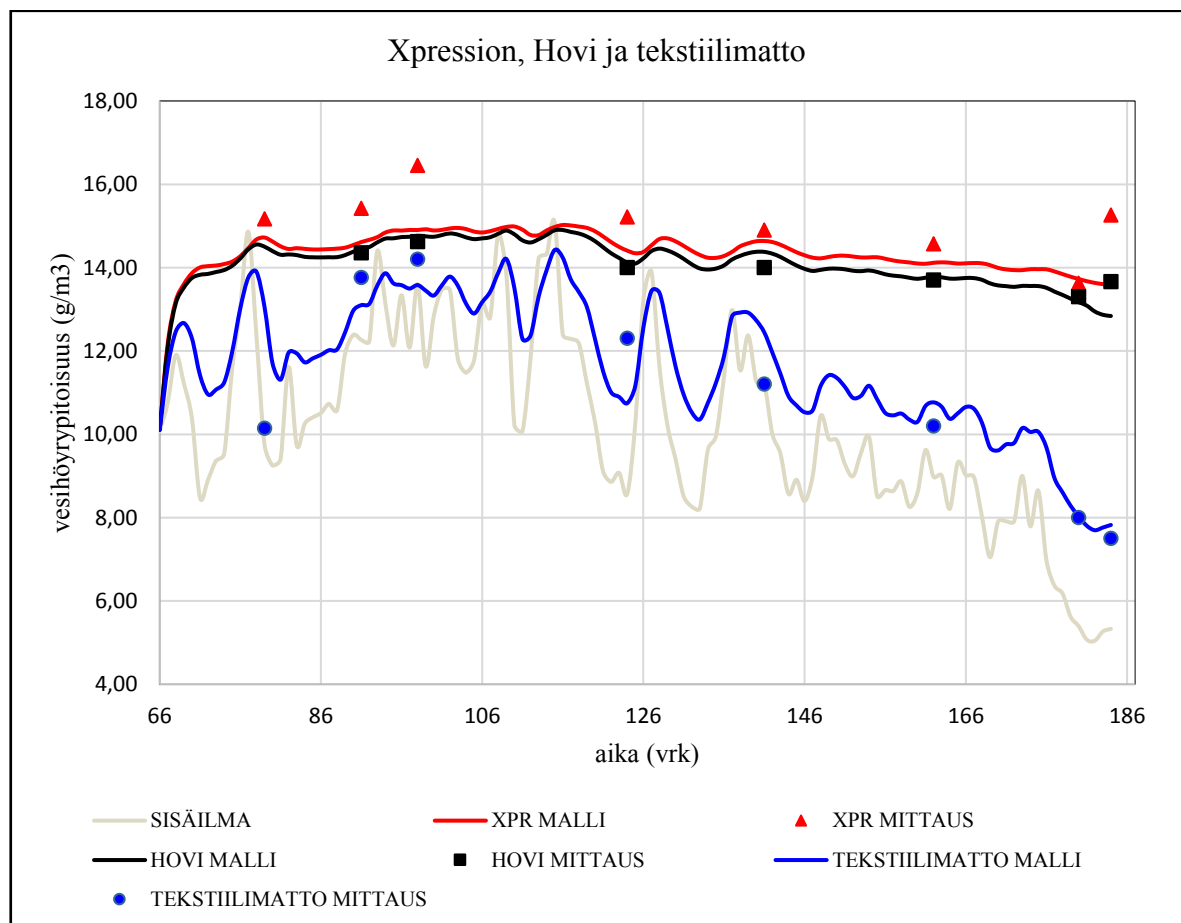
Mittaustulosten ja käyrien kulmakertoimien perusteella homogeeniset muovimatot Estrad ja Zero kuuluvat tiiveimpien tutkimuksessa mukana olleiden päällysteiden joukkoon. Vaikka Texlinen alkuvaiheen kosteuspitoisuus oli korkea, kuulune se käyrän kulmakertoimen perusteella läpäisevyydeltään kohtalaisesti kosteutta läpäisevien päällysteiden joukkoon.



Kuva 44 Vesihöyrypitoisuus Texline, Zero ja Estrad muovimattojen alla ajan funktiona.

Viidennessä kuvaajassa (*Kuva 45*) on esitetty tulokset pienten Xpression lankkujen (leveys ~ 100 mm), Hovilaattojen (300 x 300 mm) ja tekstiilimaton alla. Tarkastelupisteenä lankuilla sekä laatoilla oli niiden keskipiste. Vesihöyrypitoisuus Xpressionin alla on mittausajan loppuun mentäessä lähellä Hovilaatan alta mitattuja arvoja. Molempien päällysteiden alta mitatut arvot ovat kuitenkin varsin korkeita vielä mittausajan loppuvaiheessa, vaikka sisäilman kosteus on hyvin matala. Kuitupohjaisen tekstiilimaton alta mitatut vesihöyrypitoisuudet ovat huomattavasti Xpressionin ja Hovin vastaavia tuloksia matalampia. Tekstiilimaton alapuolinen vesihöyrypitoisuus seuraa sisäilman vesihöyrypitoisuutta.

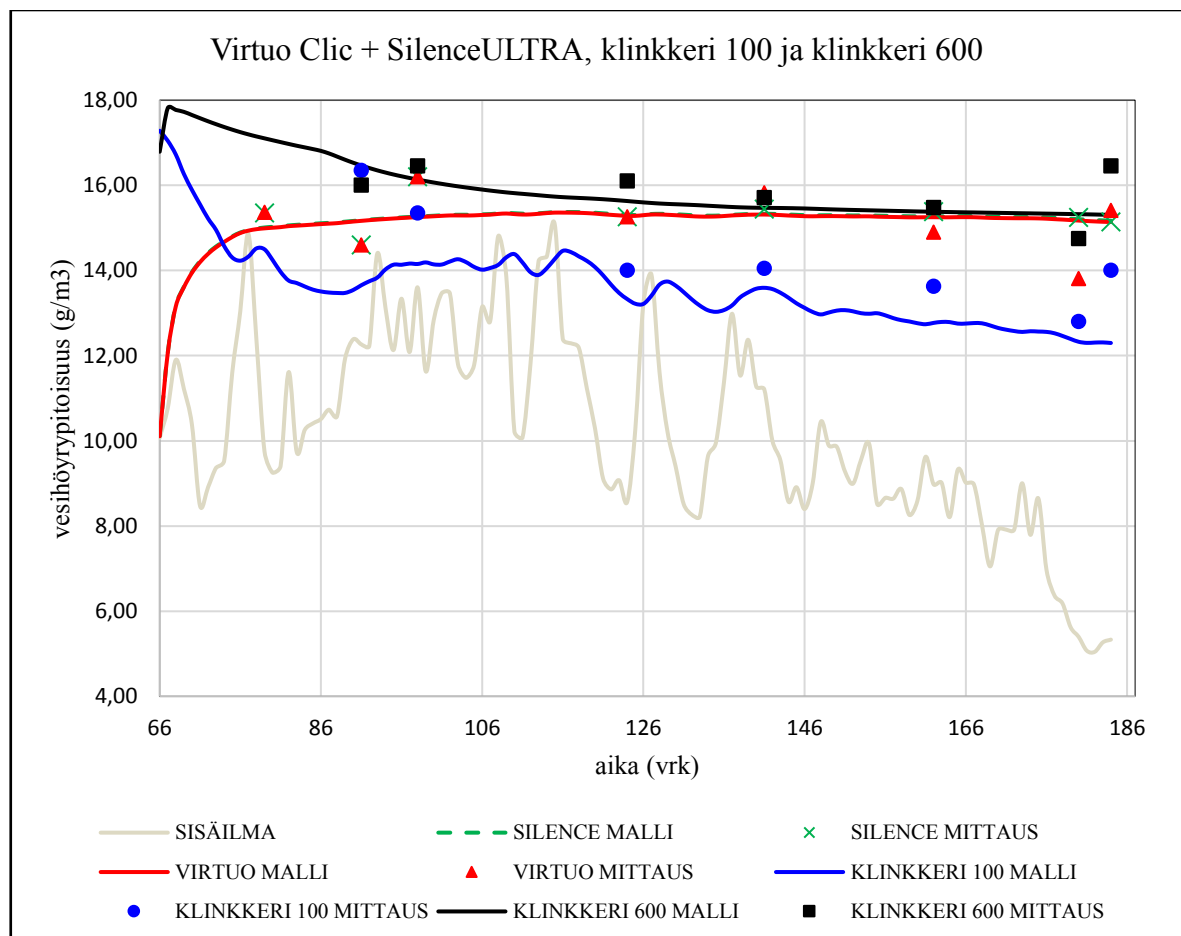
Tulosten perusteella Xpression on tuotteista tiivein, vaikka vesihöyrypitoisuus Xpression lankkujen alla on lähes samaa luokkaa kuin Hovilaattojen alla. Syy tähän on se, että lankut ovat vain noin 100 mm leveitä, jolloin lankkujen välisten saumojen rakennetta kuivattava vaikutus on selkeästi havaittavissa lankun keskellä (etäisyys saumasta vain noin 50 mm). Hovilaatat ovat lankkuja läpäisevämpiä, mutta laattojen verrattain suuri koko aiheuttaa sen, ettei saumojen rakennetta kuivattavaa vaikutusta juurikaan havaita laattojen keskellä (etäisyys saumoista noin 150 mm). Näistä kolmesta päällysteestä läpäisevin oli kuitenkin tekstiilimatto, jonka alapuolinen vesihöyrypitoisuus seurasi likimain sisäilman vesihöyrypitoisuutta. Tulosten perusteella Xpression ja Hovilaatat kuuluvat läpäisevyydeltään tutkittujen päällysteiden keskiluokkaan (kun molempien päällysteiden saumojen rakennetta kuivattava vaikutus otetaan huomioon). Kuitupohjainen tekstiilimatto kuuluu läpäisevimpien päällysteiden joukkoon.



Kuva 45 Vesihöyrypitoisuus Xpression vinyyli-laattojen, Hovi kvartsivinyyli-laattojen ja tekstiilimaton alla ajan funktiona.

Kuudennessa kuvaajassa (*Kuva 46*) on esitetty tulokset kelluvan vinyylilankun Virtuo Clic ja sen alla olevan askeläänieristeen SilenceULTRA:n alla. Lisäksi kuvaajassa on esitetty tulokset 100 x 100 mm ja 600 x 600 mm klinkkereiden alla. Pienemmillä klinkkereillä mittauspiste oli laatan keskellä (etäisyys saumasta noin 50 mm) ja isommilla klinkkereillä noin 150 mm päässä lähimmästä saumasta. Vesihöyrypitoisuus lankkujen sekä askeläänieristeen alla pysyy mittausajan alusta saakka korkeana ja lähes identtisenä, muutamaa mittaustulosta lukuun ottamatta. Klinkkerien kohdalla alun korkea vesihöyrypitoisuus johtuu todennäköisesti kiinnitys- ja saumalaastin korkeasta kosteuspitoisuudesta. Pienempien klinkkereiden kohdalla laasti kuivuu huomattavasti nopeammin kuin isompien klinkkerien kohdalla, joilla saumapinta-alaa on huomattavasti vähemmän. Saumojen rakennetta kuivattava vaikutus on molempien klinkkereiden kohdalla huomattava. Isojen klinkkereiden alla vesihöyrypitoisuus pysyttelee noin 2 g/m³ korkeamana kuin pienillä klinkkereillä, vaikka mittauspiste ei ole laatan keskellä. Tämä tarkoittaa, että laatat itsessään ovat tiiviitä ja sauman rakennetta kuivattava vaikutus muuttuu lähes olemattomaksi erityisesti isoilla laatoilla, laatan keskipistettä kohti mentäessä.

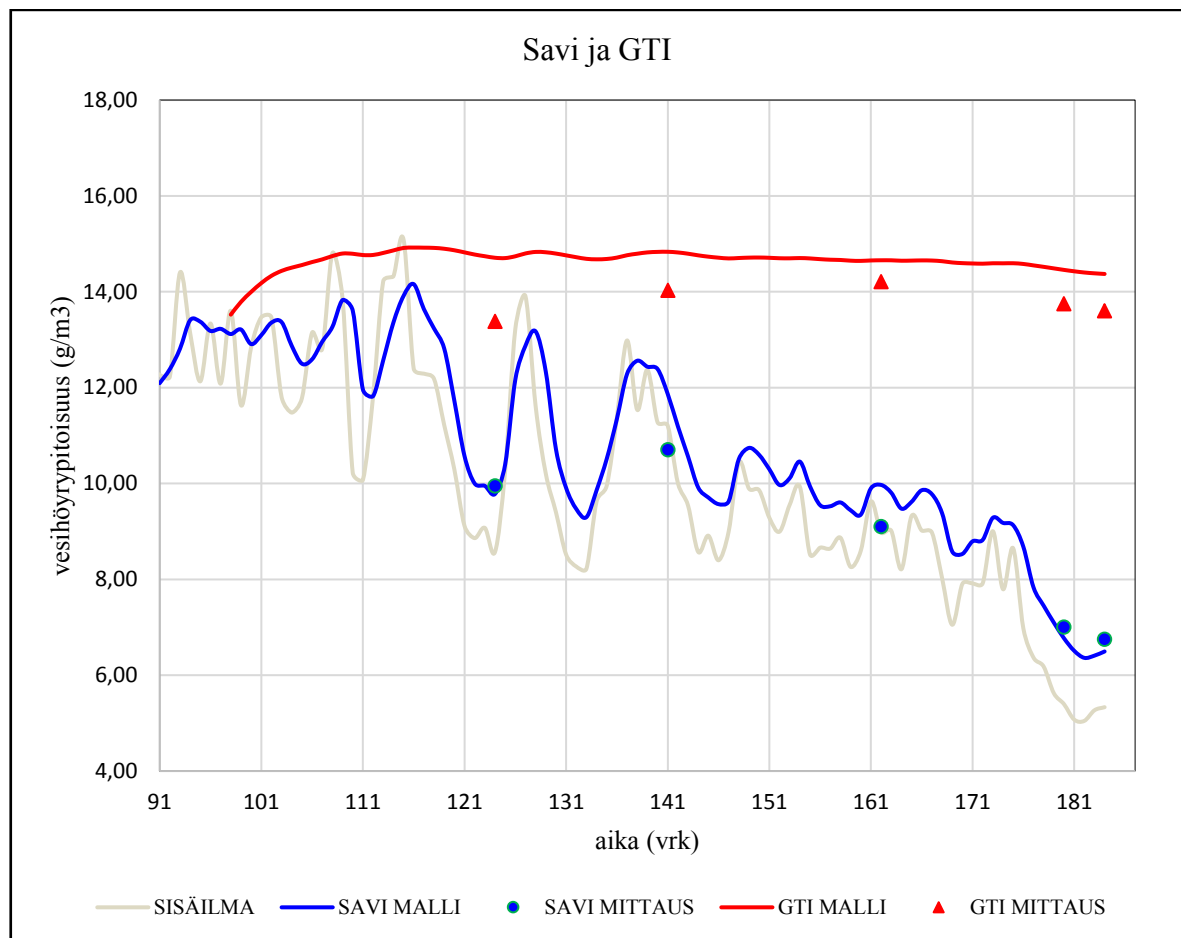
Identtiset mittaustulokset vinyylilankun sekä askeläänieristeen alla tarkoittavat, että tekstiilikuituaskeläänieriste läpäisee vesihöyryä tehokkaasti, mutta vinyylilankut ovat tulosten perusteella todella tiiviitä ja kuuluvat tutkimuksen tiiveimpien päällysteiden joukkoon. Myös isot klinkkerit kuuluvat tiiviiden päällysteiden joukkoon. Saumatut pienet klinkkerit puolestaan kuuluvat hyvin kosteutta läpäisevien päällysteiden joukkoon.



Kuva 46 Vesihöyrypitoisuus SilenceULTRA tekstiilikuituaskeläänieristeen alla, Virtuo Clic vinyylilankkujen ja SilenceULTRA:n välissä sekä klinkkereiden alla ajan funktiona.

Seitsemännessä kuvaajassa (Kuva 47) on esitetty tulokset kahden viimeisenä asennetun päällysteen, savilattian ja GTI-kalanpyrstövinyylin alla. Savilattian alta mitatut vesihöyrypitoisuudet ovat hyvin lähellä sisäilman vesihöyrypitoisuutta jokaisena mittaushetkenä. Vesihöyrypitoisuus GTI:n alla kasvaa alussa ja pysyy tarkasteluajan loppuun asti korkeana, noin 14 g/m^3 , vaikka GTI asennettiin päällysteistä viimeisenä, mikä tarkoittaa, että alapuolinen rakenne on saanut kuivua huomattavasti pidemmän aikaa kuin muilla päällysteillä.

Tulosten perusteella voidaan savilattian todeta olevan tutkituista päällysteistä kaikista parhaiten kosteutta läpäisevin. GTI kalanpyrstövinyyli puolestaan kuuluu tiiveimpien päällysteiden joukkoon.

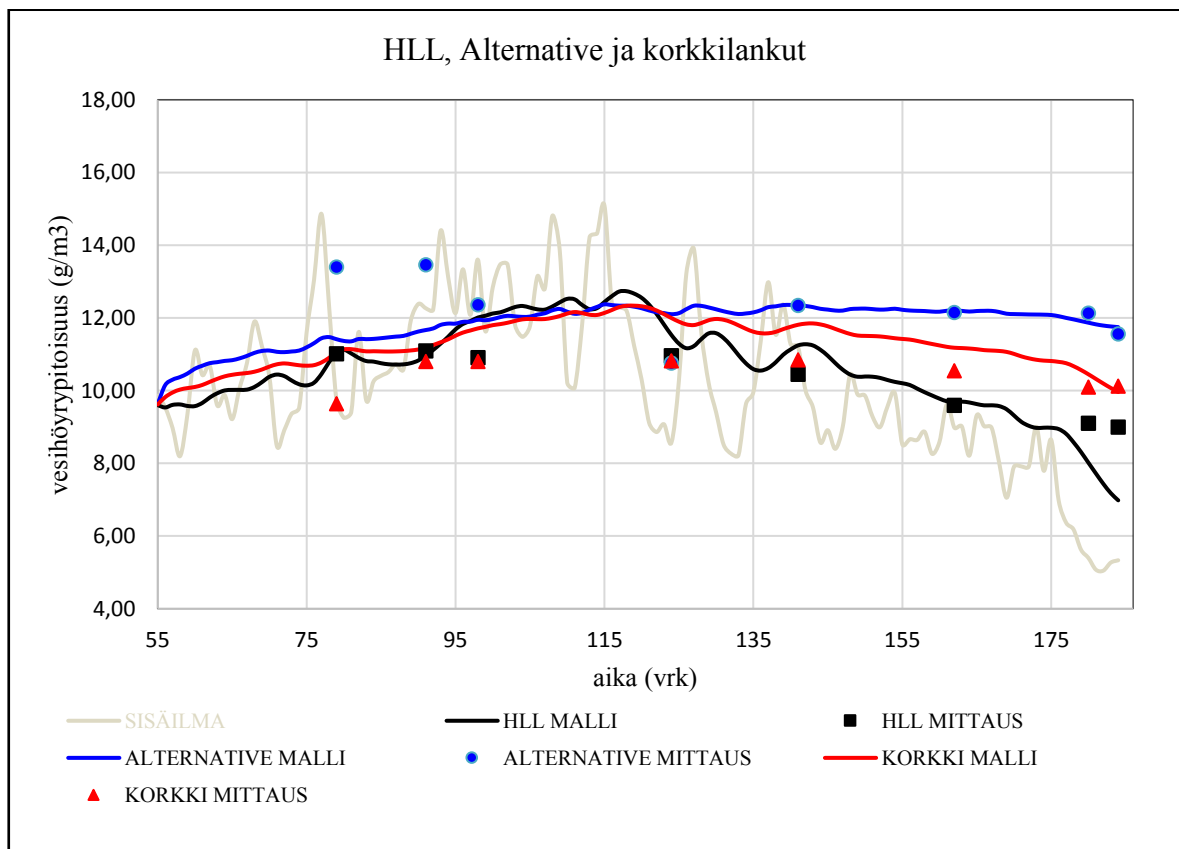


Kuva 47 Vesihöyrypitoisuus savilattian ja GTI kalanpyrstövinyylien alla ajan funktiona.

6.1.2 Huoneen B päällysteet

Kahdeksannessa kuvaajassa (Kuva 48) on esitetty tulokset huoneen B päällysteiden HLL, Alternative ja korkkilankut alla. Alternativen alta mittauksen alkuvaiheilla mitatut vesihöyrypitoisuudet ovat huomattavasti mallista saatuja tuloksia korkeammat. Tähän syynä on todennäköisesti liiman rakennetta kasteleva vaikutus, mitä ei mallissa ole otettu huomioon. Vesihöyrypitoisuus Alternativen alla pysyy tasaisen korkeana, noin 12 g/m^3 , vaikka sisäilman kosteuspitoisuus laskee loppua kohti. Lattialautojen sekä korkkilankkujen alta mitatut vesihöyrypitoisuudet ovat selvästi Alternativen alta mitattuja arvoja matalampia koko mittausajan ja loppua kohti ero tulee vielä selkeämmin näkyviin. Molempien puupohjaisten materiaalien kohdalla mallia oli aluksi hankala saada toimivaan, koska vaikka päällysteet läpäisivät hyvin kosteutta, ei päällysteiden alapuoliseen kosteuspitoisuuteen vaikuttanut sisäilman kosteuspiikeillä olevan juurikaan vaikutusta. Tämä johtui todennäköisesti sekä männyn että korkkilankuissa käytetyn HDF-levyn hygroskooppista ominaisuuksista. Molemmat tuotteet vaikuttivat tutkimuksen perusteella sitovan kosteutta itseensä sisäilman kosteuspitoisuuden ollessa korkea ja vapauttavan sitä takaisin sisäilmaan, kosteuspitoisuuden laskeessa. Vaikka molempien päällysteiden hygroskooppiset ominaisuudet huomioitiin laskennassa, ei mallia silti saatu toimivaan täysin moitteettomasti, vaan päällysteiden kosteuseroja tasaava vaikutus tuli silti aliarvioitua laskennassa.

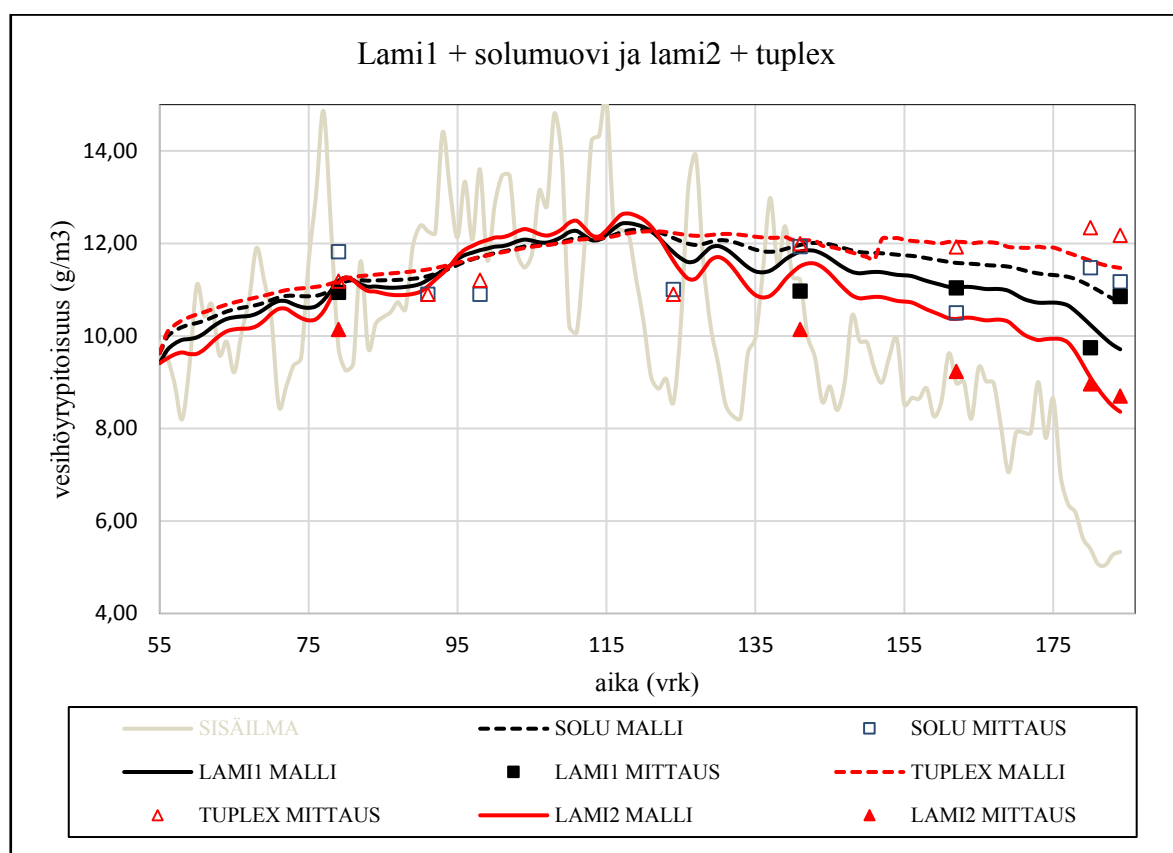
Alternative on näistä päällysteistä selkeästi tiivein ja kuuluu tutkituista päällysteistä tiiveimpien joukkoon, johtuen päällysteen alapuolista bitumikerroksesta. HLL sekä korkkilankut olivat tulosten perusteella hyvin kosteutta läpäiseviä päällysteitä.



Kuva 48 Vesihöyrypitoisuus HLL –lankkulattian, Alternative –tekstiililaattojen ja korkkilankkujen alla ajan funktiona.

Viimeisessä kuvaajassa (Kuva 49) on esitetty tulokset huoneen B laminaattilankkujen ja niiden alla käytettyjen askeläänieristeiden (solumuovi ja Tuplex) alla. Mallia oli erittäin hankala saada vastaamaan mittauksista saatuja tuloksia. Mittaustuloksista voidaan kuitenkin havaita Tuplexin alapuolisen vesihöyrypitoisuuden olevan kaikista suurin ja Tuplexin yläpuolisen (laminaatin alla) vesihöyrypitoisuuden olevan kaikista pienin. Solumuovin ja toisen laminaatin (lami2) alapuoliset vesihöyrypitoisuudet ovat huomattavasti lähempänä toisiaan.

Tulosten perusteella Tuplex on selvästi tiiviimpi kuin solumuovi, kuten alun perin oletettiin. Laminaatti läpäisee kosteutta varsin hyvin ja vaikuttaa myös siltä, että laminaatin HDF-runko tasaa kosteusvaihteluita vastaavaan tapaan kuin korkkilankuilla. Laminaatin HDF-rungon kosteutta tasaavaa vaikutusta kuitenkin heikentää rungon molemminpuoliset tiiviimmät kerrokset (vastavetolaminaatti ja pintalakka).



Kuva 49 Vesihöyrypitoisuus solumuoviaskeläänieristeen alla, solumuovin ja laminaatin välissä, Tuplex askeläänieristeen alla sekä Tuplexin ja laminaatin välissä ajan funktiona.

6.2 Tulosten luotettavuuden analysointi

Kenttäolosuhteissa tehtyjen mittausten tarkkuus on aina laboratorio-olosuhteissa tehtyjä mittausten huonompi, johtuen muun muassa olosuhteiden epätasaisuudesta. Esimerkiksi lämpö- ja kosteusolosuhteet tutkitun alapohjarakenteen alla saattoivat poiketa huomattavastikin laskennassa käytetyistä arvoista eripuolilla rakennetta. Lisäksi mm. betonin paksuus tai rakennusmuovin kunto saattoivat vaihdella rakenteen eri päällysteiden alla, milloin tulosten vertailukelpoisuus kärsii.

Tulosten luotettavuutta analysoidessa tulee huomioida myös kenttämittauksissa käytetyn mittauslaitteiston epätarkkuus. Tässä tutkimuksessa käytettyjen mittausantureiden tarkkuus suhteellisen kosteuden mittauksessa on $\pm 1,5$ %, kun RH 0 – 90 %, ja $\pm 2,5$ %, kun RH 90 – 100 %. Lämpötilan mittauksessa mittauks tarkkuus on $\pm 0,2$ °C. Ilmoitetut tarkkuudet pätevät lämpötilan ollessa välillä 0 – 40 °C. (Vaisala 2017)

Tutkimuksessa käytetyille materiaaleille laskentaa varten valitut materiaaliominaisuudet voivat omalta osaltaan vääristää saatuja tuloksia huomattavasti. Kirjallisuudessa ja materiaali valmistajilta saaduissa ominaisuuksissa oli suuria lähdekohtaisia eroja, joten voi olla mahdollista, että materiaalille annetut ominaisuudet poikkeavat huomattavasti materiaalin todellisista ominaisuuksista. Lisäksi joidenkin materiaalien tiettyjä materiaaliarvoja ei löytynyt kirjallisuudesta ollenkaan, joten näiden materiaalien kohdalla laskennassa käytetyt arvot perustuvat lähinnä valistuneeseen arvaukseen. Suurimpia lähdekohtaisia eroja oli päällysteiden vesihöyrynläpäisevyydessä, minkä vaikutus koko rakenteen kosteustekniseen toimintaan on suuri. Päällysteiden vesihöyrynläpäisevyyden arvoja muutettiin tarvittaessa, jotta mallista saadut tulokset saatiin paremmin vastaamaan kenttämittauksista saatuja tuloksia. Vesihöyrynläpäisevyyden lisäksi, muun muassa betonille ja tasoitekerroksille lasketuissa kosteusdiffusiviteettien arvoissa saattaa olla suuria eroja materiaalien todellisiin arvoihin. Lattiatbetonin vesisementtisuhde ei ollut tutkimusta varten selvillä, vaikka sen vaikutus betonin kosteusdiffusiviteettiin on merkittävä. Myös betonilaatan alla olleen rakennusmuovin todellisten ominaisuuksien arvioiminen oli hankalaa mm. sen huonosta kunnosta johtuen.

Laskennassa tehtiin lisäksi monia yksinkertaistuksia, jotka voivat vääristää laskennasta saatuja tuloksia. Laskennassa ei esimerkiksi huomioitu päällysteen liiman tai primerin rakennetta kastelevaa vaikutusta. Laskennassa ei myöskään huomioitu lämpötilan vaikutusta materiaaliominaisuuksiin tai esimerkiksi siihen kuinka suhteellinen kosteus betonissa saattaa todellisuudessa nousta lämpötilan kasvaessa.

Tästä tutkimuksesta saadut tulokset pätevät ainoastaan tutkituilla yksittäistapauksilla, eikä niitä voida suoraan hyödyntää muissa vastaavissa tapauksissa. Päällystevalintoja tehtäessä tulee kyseinen kohde aina arvioida rakenne-/kohdekohtaisesti. Eri päällysteiden alapuolisten vesihöyrypitoisuuserojen suhteen tutkimusprosessi on kuitenkin suhteellisen luotettava ja antaa näin ollen suuntaa antavaa tietoa siitä, mitä päällysteitä kannattaa suosia lämmöneristämättömiä maanvastaisia betonilattioita päällystettäessä.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen lähtökohdat

Rakennusten sisäilmaongelmien yksi pääaiheuttajista on maata vasten olevan alapohjarakenteen kosteusvaurio. Vanhojen alapohjarakenteiden kosteusvaurioitumisen yhtenä pääsyyinä voidaan pitää riittämätöntä rakennusfysiikan sekä päällysteiden ominaisuuksien tuntemista suunnitteluvaiheessa. Rakennetta tai sen korjaamista suunniteltaessa tulee ymmärtää alapohjarakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymisen perusteet sekä tuntea päällysteen rakennusfysikaaliset ominaisuudet, erityisesti vesihöyryn läpäisevyys ja kosteudensietokyky. Liian tiivis päällyste aiheuttaa erityisesti vanhoissa, lämmön- ja kosteudeneristämättömissä alapohjarakenteissa kosteuspitoisuuden nousemista päällysteen ja betonilaatan välissä, jolloin pintamateriaalit saattavat vaurioitua.

Tutkimuksen tarkoitus ja tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli vertailla maanvastaisen lämmöneristämättömän betonialapohjarakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa, kun rakenne päällystetään eri lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet omaavilla päällysteillä. Lisäksi tavoitteena oli luoda laskentamalli, josta saadut tulokset korreloivat kenttämittauksista saatujen tulosten kanssa. Saatujen tulosten perusteella oli tarkoitus tehdä lista päällysteistä, joita voidaan jatkossa suositella käytettävän vastaavanlaisia rakenteita päällystettäessä.

Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen toteutus

Tutkimuksessa luotiin kaksidimensioinen tietomalli COMSOL Multiphysics –ohjelmalla simuloimaan alapohjarakenteen lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa eri päällystevariaatioilla. Tietomallin tueksi valmisteltiin laajat kenttämittaukset, joista saaduilla tuloksilla validoitiin tietomallin toimintaa. Tutkimuksessa kaksi hieman toisistaan poikkeavaa alapohjarakennetta päällystettiin yhteensä 23 eri päällysteyhdistelmällä. Alapohjarakenteen lämpö- ja kosteuskäyttäytymistä seurattiin 3 – 5 kuukauden ajan riippuen päällysteen asentamisajankohdasta.

Tutkimustulokset

Tulosten perusteella voidaan havaita selkeitä eroja päällysteiden alapuolisissa vesihöyrypitoisuuksissa jo näin lyhyellä aikavälillä. Tutkimustuloksista yllätyksenä tuli erikoisvinyylipohjaisen Flotex tekstiilimaton odotettua korkeampi kosteuden läpäisykyky. Ennen tutkimusta Flotexin erikoisvinyylikerroksen kuviteltiin hidastavan rakenteen kuivumista huomattavasti, mutta näin ei tulosten perusteella kuitenkaan ollut. Myös puupohjaisten tuotteiden kyky tasata sisäilman kosteusvaihteluita oli odotettua selkeämmin nähtävissä. Uutena tutkimustuloksena saatiin lisäksi sivilattian ja kuitukangaspohjaisen tekstiilimaton erinomaiset kosteuden läpäisyominaisuudet. Yllätyksenä tuli myös vesiohenteisen hiertoepoksinnoitteen matala kosteuden läpäisykyky. Hiertoepoksinnoitteen oletettiin ennen tutkimusta kuuluvan läpäisevimpien päällysteiden joukkoon.

Tutkimuksen tuloksena syntyi seuraavalla sivulla oleva lista, jossa tutkitut päällysteet on jaettu ryhmiin niiden kosteuden läpäisevyyden perusteella (*Taulukko 16*). Listassa on eritelty tulosten perusteella hyvin, kohtalaisesti ja heikosti kosteutta läpäisevät päällysteet.

Taulukko 16 Tutkimuksessa mukana olleet päällysteet jaettuina ryhmiin kosteuden läpäisevyyden perusteella.

Hyvin	Kohtalaisesti	Heikosti
Savilattia	Marmoleum (linoleumi)	Epoxy Barrier (kapseloiva epoksi)
Tekstiilimatto (kuitukangaspohja)	Hovilaatta	PU (polyuretaanimassa)
Flotex tekstiilimatto (erikoisvinyylipohja)	Texline muovimatto (kerroksellinen)	SL (epoksimassa)
Pienet klinkkeri (saumattuna)	Xpression pienet lankut	HM W (hiertoepoksi)
Lattialankut (HLL)		Zero muovimatto (homogeeninen)
Laminaattilankut		Estrad muovimatto (homogeeninen)
Korkkilankut		Isot klinkkerit (saumattuna)
		Alternative tekstiililaatat (bitumipohja)
		Virtuo Clic vinyylilankut
		Norament kumilaatta
		GTI kalanpyrstövinyyli

Johtopäätökset

Vanhaa maanvastaista lämmöneristämätöntä alapohjarakennetta päällystettäessä tulee suosia tämän tutkimuksen perusteella hyvin kosteutta läpäiseviä päällysteitä. Tämän tutkimuksen perusteella heikosti kosteutta läpäisevien päällysteiden käyttöä tulee välttää vanhoissa lämmöneristämättömissä alapohjarakenteissa. Tutkimuksen perusteella kohtalaisesti kosteutta läpäiseviä päällysteitä käytettäessä, tulee rakenteen lämpö- ja kosteustekninen toiminta olla poikkeuksellisen huolellisesti arvioitu ja mallinnettu etukäteen.

Tässä tutkimuksessa keskityttiin pelkästään päällysteiden vesihöyryn läpäisevyyteen. Päällystettä valittaessa tulee kuitenkin kiinnittää huomiota myös muihin kosteusvaurioiden ennaltaehkäisyn kannalta oleellisiin seikkoihin kuten päällysteen kosteudensietokykyyn. Toiset päällysteet vaurioituvat herkemmin ja matalammista kosteuspitoisuuksista kuin toiset, joten osalla päällysteistä voidaan sallia huomattavasti korkeampia alapuolisia kosteuspitoisuuksia kuin toisilla.

Jatkotutkimustarpeet

Vaikka tulosten perusteella havaitaan selkeitä päällystekohtaisia eroja lyhyellä aikavälillä, tulee kenttämittauksia jatkaa siten, että viimeisenä asennetun päällysteen asentamisesta tulee kuluneeksi vähintään yksi vuosi. Tällöin pystytään todennäköisesti havaitsemaan eroja myös vesihöyryn läpäisykyvyltään toisiaan lähempänä olevien päällysteiden välillä. Lisäksi pystytään paremmin huomioimaan sisäilman kosteuspitoisuuden vaihteluiden vaikutus pintamateriaalin alapuoliseen kosteuspitoisuuteen.

Selkeänä jatkotutkimustarpeena nousee esille haihtuvien orgaanisten yhdisteiden mittaaminen päällysteiden pinnoilta. VOC-emissioita tulisi mitata pintamateriaalien päältä noin parin vuoden kuluttua materiaalin asentamisesta, jolloin mittauksen kohteena olisivat juurikin kosteudesta ja betonin alkalisuudesta johtuvat sekundääriemissiot. Pintaemissioiden lisäksi pintamateriaalista voidaan ottaa materiaalinäyte laboratoriossa tehtäviä emissiomittauksia varten (VOC-Bulk). Tällöin eri mittausmenetelmillä saatuja tuloksia pystytään vertailemaan keskenään ja saadaan kattavaa dataa eri pintamateriaalien sekundääriemissioista.

Joidenkin päällysteiden kohdalla myös mahdolliset mikrobitutkimukset ovat perusteltuja. Osa pintamateriaaleista tarjoaa hyvän kasvualustan mikrobikasvulle ja kosteuspitoisuuden ollessa pidemmän aikaa korkea on mikrobikasvuston alkaminen mahdollista.

LÄHTEET

- Ahlgren, L. 1972. Fuktfixering i porösa byggnadsmaterial. Rapport 36. Institutionen för byggnadsteknik, Tekniska Högskolan i Lund, 200 s.
- Alexandersson, J. 2004. Secondary emission from alkali attack on adhesives and PVC floorings, Byggnadsmaterial, Rapport TVBM-3115. Lunds Tekniska Högskola, 29 s.
- Banthia, N. ja Mindess, S. 1989. Water permeability of cement paste. Article in cement and concrete research. Vol. 19, s. 727 – 736.
- Berry, M. A. 2002. Final report of the hydrolab project 2001 flooring, humidity, and mold growth. Prepared for the carpet and rug institute.
- Betonghandbok. 1997. Material, utgåva 2. Svensk Byggtjänst. Stockholm, 1127 s.
- Björk, F., Eriksson, C-A., Karlsson, S. ja Khabbaz, F. 2003. Degradation of components in flooring systems in humid and alkaline environments. Construction and Building Materials 17. s. 213 – 221.
- Brewer, H. W. 1965. Moisture migration – Concrete slab-on-ground construction. Portland Cement Association. Bulletin D89. 24 s.
- by54/BLY12. 2010. Betonilattioiden pinnoitusohjeet. Suomen betoniyhdistys ry. Suomen betonilattiayhdistys ry. 64 s.
- Çengel, Y. ja Ghajar, A. 2015. Heat and mass transfer, fundamentals & applications. 5th edition. ISBN 978-981-4595-27-8. 944 s.
- Chino, S., Kato, S., Seo, J. ja Ataka, Y. 2009. Study on emission of decomposed chemicals of esters contained in PVC flooring and adhesive. 8 s.
- Clausen, P. A., Liu, Z., Kofoed-Sorensen, V., Little, J. ja Wolkoff, P. 2011. The influence of temperature on the emission of di(2ethylhexyl) phthalate (DEHP) from PVC flooring in the emission cell FLEC. Article in Environmental Science & Technology.
- Clausen, P. A., Xu, Y., Kofoed-Sorensen, V., Little, J. ja Wolkoff, P. 2006. The influence of humidity on the emission of di-(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) from vinyl flooring in the emission cell “FLEC”. Atmospheric Environment 41 s. 3217 – 3224.
- Eronen, J., Räsänen, V., Wirtanen, L. ja Penttala, V. 1998. Päälystettyjen betonilattioiden emissiot. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto, rakennusmateriaalitekniikka. Julkaisu 8. 36 s.
- Eronen, J., Wirtanen, L., Räsänen, V. ja Penttala, V. 2001. Lattiapäälysteiden vaikutus betonilattioiden kuivumiseen. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto, rakennusmateriaalitekniikka. Julkaisu 15. 32 s.

- Forbo. 2017a. Tuotteet/Linoleumi. Viitattu 12.4.2015. Luettavissa: <http://www.forbo.com/flooring/fi-fi/tuotteet/linoleumi/cibi7o>
- Forbo. 2017b. Flooring/Tuotteet/Flotex. Viitattu 80.8.2017. Luettavissa: <http://www.forbo.com/flooring/fi-fi/tuotteet/flotex/c3eccu>
- Forbo. 2017c. Sähköpostikeskustelu Janne Kyllösen kanssa 20.11.2017.
- Gerflor. 2017. Tuotteet/Koteihin/Tuote/Virtuo-clic. Viitattu 21.9.2017. Luettavissa: <http://www.gerflor.fi/tuotteet/koteihin/tuote/virtuo-clic.html>
- GTK. 2017a. Geologian tutkimuskeskus. Geologia tutuksi/ Geologiset luonnonvarat/ Geoenergia. Viitattu 6.3.2017. Luettavissa: <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/geoenergia/>
- GTK. 2017b. Geologian tutkimuskeskus. Tietoaaineistot/ Maaperäkartan käyttöopas/Pohjavesi. Viitattu 6.3.2017. Luettavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/pohjav esiintyminen.htm>. Viitattu 8.3.2017
- Hagentoft, C-E. 2001. Introduction to Building Physics. Lund, Studentlitteratur AB. 422 s.
- Heiskanen, R. 2015. Maanvastaisten seinien sisäpuolinen lisälämmöneristäminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 82 + 13 s.
- Helamaa, E. 2004. Vanhan rakentajan sanakirja. Suomalaisen kirjallisuuden seura. Helsinki. 295 s.
- Henry, R. L. ja Kurtz, G. K. 1963. Water vapor transmission of concrete and of aggregates. U.S. Naval civil engineering laboratory. Port Hueneme, California. 71 s.
- Hens, H. 2016. Applied Building Physics. Ambient Conditions, Building Performance and Material Properties. Second edition. Ernst&Sohn a Wiley Brand. 342 s.
- Hyvärinen, A., Meklin, T., Vepsäläinen, A. ja Nevalainen, A. 2002. Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials—concentrations and diversity, Internat. Biodeter. Biodegrad. 49. s. 27 – 37.
- Ilmatieteen laitos. 2014. Palvelut ja tuotteet. Rakentaminen ja kiinteistöhuolto. Rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet. Viitattu 8.3.2017. Luettavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>
- Ilmatieteen laitos. 2017. Sää ja meri/Paikallissää/Lahti Laune. Viitattu 22.10.2017.
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. ja Lavine, A. S. 2013. Principles of Heat and Mass Transfer. Seventh edition. International student version. John Wiley Sons, Inc. 1048 s.

- Järnström, H. 2005. Muovimattopinnoitteen lattiarakenteen VOC-emissiot sisäilmaongelmatapauksissa. Espoo. VTT Publications 571. 76 + 9 s.
- Järnström, H. 2007. Reference values for building material emissions and indoor air quality in residential buildings. VTT publications 672.
- Kareliaparketti. 2017. Asennus ja hoito/Parketin alusmateriaali. Viitattu 21.9.2017. Luettavissa: <http://www.kareliaparketti.fi/Asennus-ja-hoito/Parketin-alusmateriaali/>
- Karitma. 2017. Lattialaminaatit. Viitattu 21.9.2017. Luettavissa: <http://www.karitma.fi/laminaatitlatti.html>
- Kiilto. 2017a. Petri Heljon ja Lilli Puntin haastattelu 3.5.2017.
- Kiilto. 2017b. Sähköpostikeskustelu Petri Heljon kanssa 22.11.2017.
- Kurnitski, J., Vilkki, R., Jokiranta, K., Kettunen, A. ja Hejazi-Hashemi, S. 1996. Koulujen sisäilmasto ja kosteusvauriot. Teknillinen korkeakoulu, LVI-laboratorio, Talonrakennustekniikan laboratorio. Raportti B46.
- Künzel, H. M. 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart. 65 s.
- Leivo, V. ja Rantala, J. 2000. Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. Tutkimusjulkaisu 106. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, Geotekniikka. 121 s.
- Leivo, V. ja Rantala, J. 2002. Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. Tutkimusjulkaisu 120. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka. 107 + 13 s.
- Leivo, V. ja Rantala, J. 2002. Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen mitoittaminen ja korjaaminen. Tutkimusjulkaisu 121. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikka. 33 + 13 s.
- Leivo, V. ja Rantala, J. 2006. Maanvastaisten alapohjarakenteiden lämpö ja kosteus. Rakennusteollisuuden kustannus RTK oy. 59 s.
- Lin, C. C., Yu, K-P., Zhao, P. ja Lee, G. W-M. 2009. Evaluation of impact factors on VOC emissions and concentrations from wooden flooring based on chamber tests. Building and Environment 44. s. 525 – 533.
- Lindberg, R. Wahlman, J. Suonketo, J. ja Paukku, E. 2002. Kosteusvirta-tutkimus. TTK, Rakennustekniikan osasto. Julkaisu 119. 102 s.
- Lumme, P. ja Merikallio, T. 1997. Betonin kosteuden hallinta. Kestävä-Kivitalo-projekti. Betonitieto. 31 s.

Maugin, G.A. 1999. The Thermomechanics of Nonlinear Irreversible Behaviors, An Introduction, World Scientific. ISBN 981-02-3375-2. 375 s.

Mehta, P. K. ja Monteiro, P. J. M. 2014. Concrete. Microstructure, Properties, and Materials. Fourth Edition. McGraw-Hill, 675 s.

Meklin, T., Putus, T., Hyvärinen, A., Haverinen-Shaughnessy, U., Lignell, U ja Nevalainen, A. 2008. Koulurakennusten kosteus- ja homevauriot. Opas ongelmien selvittämiseen. Kansanterveyslaitoksen julkaisuja.

Merikallio, T., Niemi, S. ja Komonen, J. 2007 Betonilattiarakenteiden kosteudenhallinta ja päällystäminen. Suomen Betonitieto Oy. 97 s.

Merikallio, T. 2009. Betonilattian ”riittävän” kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa. Väitöskirja. TKK Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. Espoo. 136 s.

Modulyss. 2017. Carpet tiles. Viitattu 30.8.2017. Luettavissa: https://www.modulyss.com/en_gb/dback

Nanten. 2017. Dokumentit/Tuoteselosteet. Viitattu 20.9.2017. Luettavissa: <http://nanten.fi/fi/dokumentit/tuoteselosteet>

Neville, A.M. 2011. Properties of concrete. 5th edition. ISBN 978-0-273-75580-7. 846 s.

Nielsen, K. F., Holm, G., Utrup, L. P. ja Nielsen, P. A. 2004. Mould growth on building materials under low water activities. Influence of humidity and temperature on fungal growth and secondary metabolism. International Biodeterioration & Biodegradation 54. s. 325 – 336.

Nilsson, L-O. 1979. Fuktmätning Del 2 av byggfukt i betongplatta på mark, torknings och mätmetoder. Avdelningen för byggnadsmaterial. Lunds Tekniska Högskola. Rapport TVBM-3008, 75 s.

Nilsson, L-O. 2002. Long-term moisture transport in high performance concrete. Lund Institute of Technology. Division of Building Materials. In Materials and Structures 35(10). s. 641 – 649.

Nilsson, L-O, Sjöberg, A. ja Togerö, Å. 2006. Fuktmätning i byggnader. Stockholm. ISBN: 91-540-5978-X. 55 s.

Palomäki, E. 2011. Rakennusmateriaaleista peräisin olevat sisäilman epäpuhtaudet. TTL.

Pergo. 2017a. Laminaatti/Lisätarvikkeet laminaatille/Alusmateriaalit. Viitattu 21.9.2017. Luettavissa: <https://www.pergo.fi/fi-fi/laminaattilattia/lisatarvikkeet/alusmateriaalit>

Piimat Oy. 2013. Tuotetietoa. Polymeeripinnoitteet. 5 s.

Pirinen, J. 2006. Pientalojen mikrobivauriot. Lähtökohtana asukkaiden kokemat terveyshaitat. TTY. Hengitysliiton julkaisuja 19/2006. Hengitysliitto Heli ry. 128 s.

Puuinfo. 2017a. Puutieto. Puu materiaalina. kosteusteknisiä ominaisuuksia. Viitattu 10.4.2017. Luettavissa: <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>

Puuinfo. 2017b. Tuotteet/Puu sisätiloissa/Lattiat/Parla –puiset lattianpäällysteet/Tekniset tiedot. Viitattu 21.9.2017. Luettavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/ParlaFix_FL.pdf

Puuinfo. 2017c. Tuotteet/Puu sisätiloissa/Lattiat/POLKKYpanel&floor Lattialaudat. Esite. Viitattu 21.9.2017. Luettavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/polcky_panelfloor_lattialaudat_0.pdf

Putus, T. 2014. Home ja terveys. kosteusvauriohomeiden, hiivojen ja sädesienten esiintyminen sekä terveyshaitat. Uudistettu painos. Suomen ympäristö ja terveysalan kustannus oy. 144 s.

Reiser, R., Meile, A., Hofer, C. ja Knutti, R. 2002. Indoor air pollution by volatile organic compounds (VOC) emitted from flooring material in a technical university in switzerland. Swiss State Secretariat for Economic Affairs, Labor and Health. s. 1004 – 1009.

RIL 107-2000. Rakennusten veden ja kosteudeneristysohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. TummaVuoren Kirjapaino Oy. 211 s.

RIL 107-2012. Rakennuksen veden- ja kosteudeneristysohjeet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki. 219 s.

RIL 250-2011. Kosteudenhallinta ja homevaurioiden estäminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki. 243 s.

RIL 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysiikallinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki. 500 s.

RT 29-11052. 2012. Rakennusmaalaus. Talo 2000 Maalaustuotenimikkeistö. 22 s.

RT 34-10763. 2001. Keraamiset laatat, laatoitukset. 11 s.

RT 34-10997. 2010. Keraamiset laatat. 8 s.

RT 36-11113. 2013. EPS-eristeet. Lämmöneristetarvikkeet. 4 s.

Rudus. 2017a Tuotteet/Kiviainekset/Hinnasto ja esitteet/Perustus ja alapohjarakenteet. Viitattu 13.3.2017. Luettavissa: <http://www.rudus.fi/hinnasto-ja-esitteet/esitteet/kiviainesesitteet#>

- Rudus. 2017b. Tuotteet/Kiviainekset/Hinnasto ja esitteet/Pienrakentajan kiviainekset. Viitattu 13.3.2017. Luettavissa: <http://www.rudus.fi/hinnasto-ja-esitteet/esitteet/kiviainesiesitteet#>
- Rundt, A., Backlund, P. ja Paakkola, K. 2005. Sisäilman hajut ja orgaaniset epäpuhtaudet. Työterveyslääkäri [verkkolehti] no, 23, s. 156-163. Viitattu 10.4.2017 Luettavissa: http://www.ebm-guidelines.com/dtk/shk/avaa?p_artikkeli=ttl00208#s2
- Räsänen, V., Eronen, J., Wirtanen, L. ja Penttala, V. 1998. Tasoitteiden vaikutus betonilattioiden kosteustekniseen toimintaan. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto, rakennusmateriaalitekniikka. Julkaisu 9. 32 s.
- Serway, R. A. ja Jewett, J. W. 2010. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. Eighth edition. Belmont, USA. 1440 s.
- SFS-EN ISO 10456. 2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. 32 s.
- SFS-EN ISO 13788. 2013. Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods. 40 s.
- SFS-EN 14411. 2016. Ceramic tiles. Definition, classification, characteristics, assessment and verification of constancy of performance and marking. 84 s.
- SFS-EN 15026. 2007. Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation. 24 s.
- SFS-EN 1504-2. 2005. Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. Määritelmät, vaatimukset, laadunvalvonta ja vaatimustenmukaisuuden arviointi. Osa 2: Betonipinnan suojaus. 40 s.
- Shaugnessy, E. J., Katz, I. M. ja Schaffer, J. P. 2005. Introduction to fluid mechanics. Oxford university press. 1018 s.
- Siikanen, U. 2014. Rakennusfysiikka, perusteet ja sovellukset. Rakennustieto Oy, Helsinki. ISBN: 978-952-267-001-4. 256 s.
- Sisäilmayhdistys. 2017. Terveelliset tilat/Ongelmien tutkiminen/Mikrobitutkimukset/Indikaattorit. Viitattu 17.7.2017. Luettavissa: <http://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Ongelmien-tutkiminen/Mikrobitutkimukset/Indikaattorit>
- SIT 41-610079. 2011. Keraamiset laatat. 11 s.
- Sjöberg, A. 2001. Secondary emission from concrete floors with bonded flooring materials. Effect of alkaline hydrolysis and stored decomposition products. Chalmers University of technology. Department of Building Materials. Göteborg, 188 s.

SP. 2014. SP Technical Research Institute of Sweden. Report 4F006425.

Suomen Betonitieto Oy. 2007. Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet. 47 s.

Suomen Betoniyhdistys r.y. 2004. Betonitekniikan oppikirja by 201. Jyväskylä, Gummerus Oy. 570 s.

Thermisol. 2016a. Eristeet. Lattiaeristeet. EPS 100 lattia. Viitattu 3.4.2017. Luettavissa: <http://www.thermisol.fi/uploads/pdf/tuotteet/EPS100:100SLattia.pdf>

Thermisol. 2016b. Eristeet. Lattiaeristeet. Platina lattia. Viitattu 3.4.2017. Luettavissa: <http://www.thermisol.fi/uploads/pdf/tuotteet/PlatinaLattia.pdf>

Trio floor. 2017. Korkkilattiat/Esite. Viitattu 21.9.2017. Luettavissa: <http://trio-floor.fi/korkkilattiat/esite/>

TTL. 2011. PVC-muovin työstössä muodostuvien ilman epäpuhtauksien tavoitetaso-
rustelumuistio. TY-03-2011. 13 s.

TTL. 2017. Kooste toimistoympäristöjen epäpuhtaus- ja olosuhdetasoista (rakennuk-
sissa, joissa on koneellinen ilmanvaihto), joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-on-
gelmiin. Viitattu 10.4.2017. Luettavissa: [https://www.ttl.fi/wp-con-
tent/uploads/2016/09/sisaympariston-viitearvoja.pdf](https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/09/sisaympariston-viitearvoja.pdf).

Tukes. 2013. Kuluttajille. Kemikaalit aineryhmittäin. Ftalaatit. Viitattu 10.4.2017. Luet-
tavissa: <http://www.tukes.fi/fi/Kuluttajille/Kemikaalit-aineryhmittain/>

Tuomainen, A., Seuri, M. ja Sieppi, A. 2003. Indoor air quality and health problems as-
sociated with damp floor coverings. Int Arch Occup Environ Health 2004; 77. s. 222 –
226.

Upofloor. 2017a. Tuotteet/Upofloor Estrad. Viitattu 15.4.2017. Luettavissa: <http://www.upofloor.fi/Resilient/Tuotteet/upofloor-estrاد/>

Upofloor. 2017b. Tuotteet/Upofloor Quartz. Viitattu 15.4.2017. Luettavissa: <http://www.upofloor.fi/Resilient/Tuotteet/upofloor-quartz/>

Upofloor. 2017c. Tuotteet/LifeLine. Viitattu 17.4.2017. Luettavissa: [http://www.upo-
floor.fi/Resilient/Tuotteet/lifeline/lifeline-laatta/](http://www.upo-floor.fi/Resilient/Tuotteet/lifeline/lifeline-laatta/)

Upofloor. 2017d. Tuotteet/Upofloor Zero. Viitattu 17.4.2017. Luettavissa: <http://www.upofloor.fi/Resilient/Tuotteet/upofloor-zero/>

Upofloor. 2017e. Sähköpostikeskustelu Tomi Tehomaan kanssa. 22.5.2017.

Vaisala. 2017. Tuotteet ja palvelut/Kosteusmittalaitteet/HMP110. Viitattu 20.10.2017.
Luettavissa: <http://www.vaisala.fi/fi/products/humidity/Pages/HM40.aspx>

Van der Wal, J. F., Hoogeveen, A. W. ja Wouda, P. 1997. The influence of temperature on the emission of volatile organic compounds from PVC flooring, carpet, and paint. *International Journal of Indoor Environment and Health*. Volume 7, Issue 3. s. 215 – 221.

Viitanen, H. 2004. Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet – betonin homeenkesto. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, 26 s.

Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A. ja Palo-lahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennuksen energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 159. Tampere.

VTT. 2000. Determination of water vapour transmission properties of plastic films and laminates. Test report No. RTE1610/00. 15.5.2000.

VTT. 2006. Enomer-laatta LifeLine:n ja Enomer-matto LifeLine:n vesihöyrynläpäisyn määrittäminen. Testauseloste Nro. VTT-S-2065-06. 27.2.1006.

VTT. 2007. LifeLine CS. Emission measurements for the Finnish Classification of Building Materials. Test report No. VTT-S-04272-07/GB.

VTT. 2014. Betonipinnan suojausmaalaus. Tyypitestit CE-merkintää varten. Tutkimuselostus Nro VTT-S-00904-15. 3.3.2015.

VTT. 2017a. Determination of water vapour transmission properties of flooring Estrad 40203. Test Report. VTT-S-02781-17. 16.5.2017.

VTT. 2017b. Determination of water vapour transmission properties of flooring Zero 5702. Test Report. VTT-S-02782-17. 16.5.2017.

Weber. 2017. Lattiaseminaari. 31.5.2017.

Winslow, D. ja Liu, D. 1990. Water permeability of cement paste. Article in cement and concrete research. Vol. 20, s. 227 – 235.

Wolkoff, P. 1998. Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products. National Institute of Occupational Health, Lerso Parkalle 105, DK-2100 Copenhagen Ø, Denmark. *Atmospheric Environment* 32. s. 2659 – 2668.

YM. 2015. Kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. 5. Rakenteiden kosteustekniikan käyttäytyminen. Ympäristöministeriö. Viitattu 2.3.2017. Luettavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Lausuntopyynnot_ ja_lausuntoyhteenvedot/2015/Lausuntopyynto_luonnoksesta_rakennusten_%2832552%29.

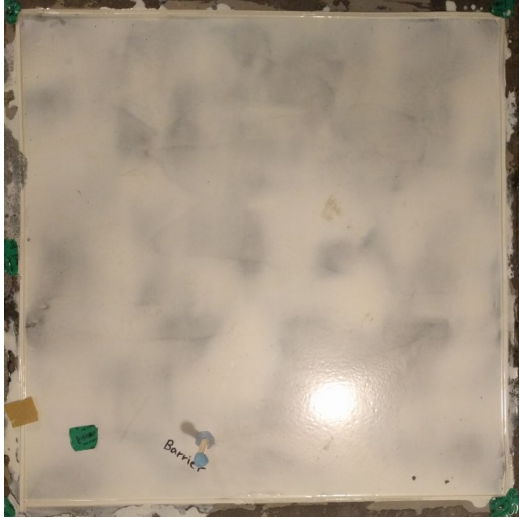
Liitteet

Liite 1. Valokuvat tutkituista päällysteistä. 4 sivua.

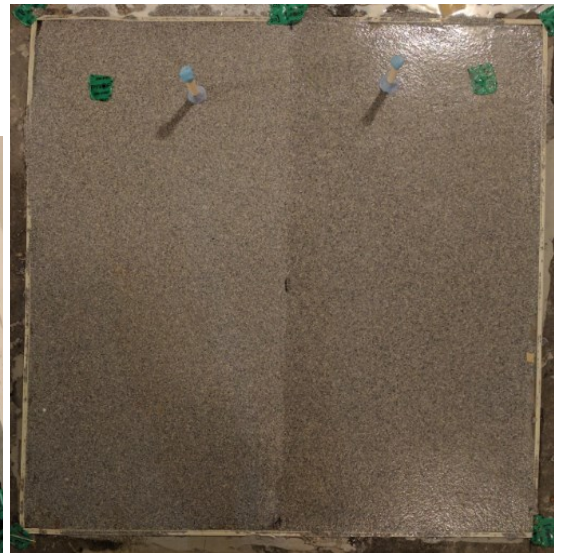
Liite 2. COMSOL Multiphysics –ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet. 3 sivua.

Liite 3. Päällysteiden alta mitatut vesihöyrypitoisuudet tutkimuksen aikana. 2 sivua.

Liite 1. Valokuvat tutkituista päällysteistä



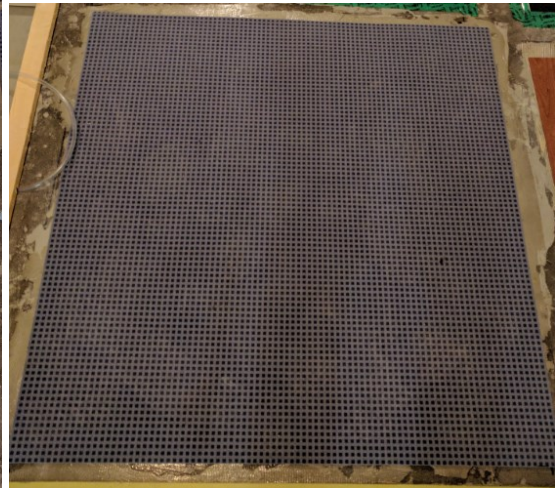
Kuva 50 Ruutu 1, Barrier kapseloiva epoksinnoite. Ruutu 2, PU Bio polyuretaanipinnoite.



Kuva 51 Ruutu 3, SL Bio epoksinnoite. Ruutu 4a ja 4b, HM W hiertoepoksi, b:ssä pintalakka.



Kuva 52 Ruutu 5, Virtuo clic kelluva vinyylilankku + silenceULTRA askeläänieriste. Ruutu 6, Texline irtoasennettava muovimatto.



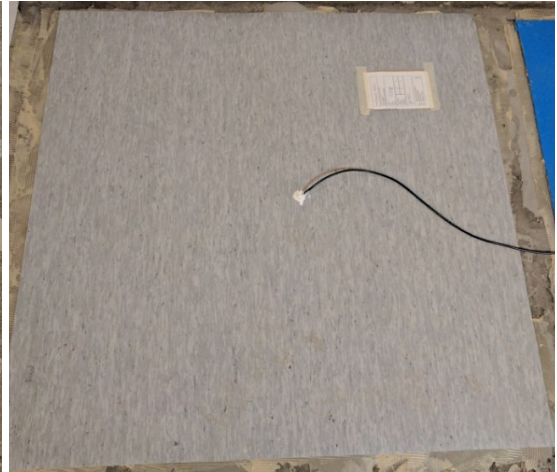
Kuva 53 Ruutu 7, sivilattia. Ruutu 8, Flotex tekstiilimatto.



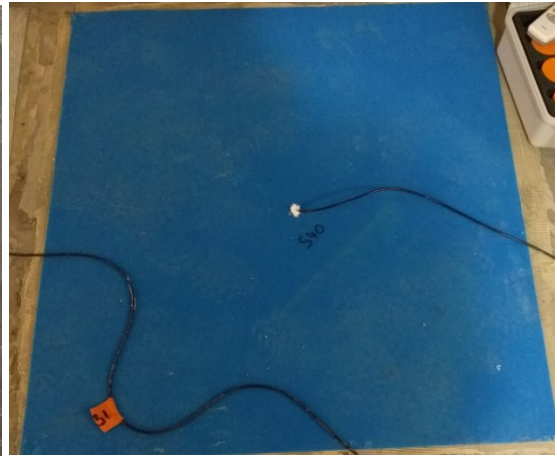
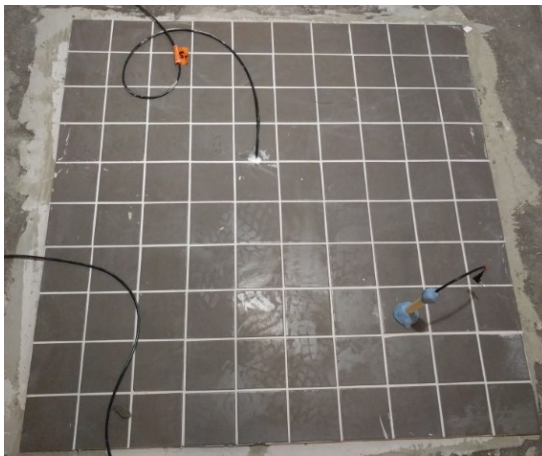
Kuva 54 Ruutu 9, Xpression Enemor-lankut. Ruutu 10, Norament kumilaatta.



Kuva 55 Ruutu 11, Marmoleum linoleumi. Ruutu 12, Zero Enomer-muovimatto.



Kuva 56 Ruutu 13, Hovi kvartsivinyylilaatta 300x300. Ruutu 14, Estrad PVC-muovimatto.



Kuva 57 Ruutu 15, Hitit klinkkeri 100x100. Ruutu 16, tekstiilimatto.



Kuva 58 Ruutu 17, Ceramica klinkkeri 600x600. Ruutu 18, GTI kelluva kalanpyrstövinyyli.

Liite 1 (4/4)



Kuva 59 Ruutu 19, HLL lankkulattia. Ruutu 20, Alternative tekstiililaatat.



Kuva 60 Ruutu 21, laminaatti + solumuovi. Ruutu 22, laminaatti + Tuplex.



Kuva 61 Ruutu 23, korkkilankut.

Liite 2. Mallinnuksessa käytetyt materiaaliominaisuudet

Alla olevassa taulukossa (*Taulukko 17*) on annettu mallinnuksessa käytetyt materiaaliominaisuuksien arvot.

Taulukko 17 COMSOL Multiphysics –ohjelmassa käytetyt materiaaliominaisuudet.

Materiaali	d (mm)	δp (kg/msPa)	Dw (m ² /s)	w (kg/m ³)	λ (W/mK)	ρ (kg/m ³)	cp (J/kgK)
Alapohjarakenne							
Muovikalvo	0.1	Sd = 2 m	1e-16	0.1	0.4	1000	2300
Betoni	10 - 100	1.5e-12	Dw.betoni	wbetoni	λ betoni	2100	1000
Tasoite-/pohjustuskerros							
Vetonit 6000	10	6.6e-12	Dw.tasoite	wtasoite	1	1800	1100
Vetonit 3100	3	6.6e-12	Dw.tasoite	wtasoite	1	2000	1100
Vetonit MD 16	0.05	Sd = 0.6 m	1e-16	0.1	0.4	1000	2300
Ultralite S	3 - 5	6.6e-12	1e-16	0.1	1	1800	1000
Ultracolor Plus	6 - 10	6.6e-12	1e-16	0.1	1	1800	1000
Pinnoitteet							
Epoxy Barrier	0.8	5e-14	1e-16	0.1	0.25	1200	1400
HM Bio epoksi	0.5	7e-14	1e-16	0.1	0.25	1200	1400
PU Bio (sis. Primer)	2	6e-14	1e-16	0.1	0.25	1200	1800
SL Bio (sis. Primer)	2	2e-13	1e-16	0.1	0.25	1200	1400
HM W (sis. hiekan)	3	3e-13	1e-16	0.1	0.25	1200	1300
Askeläänieristeet							
SilenceULTRA	1.8	1.3e-11	1e-16	0.1	0.05	200	1300
Solumuovi	2	2e-12	1e-16	0.1	0.05	200	1300
Tuplex	2.5	5e-13	1e-16	0.1	0.05	200	1300
Päällysteet							
Virtuo Clic	5	9e-14	1e-16	0.1	0.25	1500	1400
Texline	2.9	3e-13	1e-16	0.1	0.25	1300	1400
Savilattia	16.5	3e-11	1e-16	wsavi	1.5	1800	2000
Flotex + liima	4.3	1.5e-12	1e-16	0.1	0.09	400	1300
Xpression + liima	2	9e-15	1e-16	0.1	0.2	1600	1400
Norament + liima	3.6	7e-14	1e-16	0.1	0.17	1200	1400
Marmoleum	2.5	2e-13	1e-16	0.1	0.17	1200	1400
Estrad ja Zero + liima	2	9e-15	1e-16	0.1	0.2	1500	1400
Hovilaatta + liima	2	2e-13	1e-16	0.1	0.3	2000	1400
Tekstiilimatto + liima	4	3e-12	1e-16	0.1	0.06	200	1300
Klinkkerit	6,10.5	2e-14	1e-16	0.1	1.3	2300	840
GTI	6	2e-13	1e-16	0.1	0.25	1560	1400

Liite 2 (2/3)

HLL (sis. aal-topahvi ja lakka)	28	5e-11	1e-16	wmänty	0.15	500	1600
Alternative + liima	6.5	6e-13	1e-16	0.1	0.1	700	1000
Laminaatti	8	2e-12	1e-16	0.1	0.1	1000	1400
Korkkilankut	10	3e-12	1e-16	whdf	0.08	600	1700

Alla olevassa taulukossa (*Taulukko 18*) on annettu laskennassa käytetyt betonin lämmönjohtavuuden arvot (λ_{betoni}) betonin kosteuspitoisuuden funktiona.

Taulukko 18 Betonin lämmönjohtavuuden arvot betonin kosteuspitoisuuden funktiona (Vinha et al. 2013).

Betoni	w (kg/m ³)	0	180
	λ (W/mK)	1.6	2.6

Alla olevassa taulukossa (*Taulukko 19*) on annettu laskennassa käytetyt kosteuspitoisuuden arvot huokosilman suhteellisen kosteuden funktiona.

Taulukko 19 Materiaalien tasapainokosteuskäyrät (absorptio).

Betoni	RH (%)	0	0.35	0.5	0.7	0.8	0.9	0.95	0.96	0.97	0.98
	w (kg/m ³)	0	33	40	53	64	84	104	109	116	124
Tasoite	RH (%)	0	0.35	0.5	0.7	0.8	0.9	0.95	0.96	0.97	0.98
	w (kg/m ³)	0	21	28	44	60	94	136	150	169	193
Mänty	RH (%)	0	0.35	0.5	0.7	0.8	0.9	0.95	0.98		
	w (kg/m ³)	0	44	64	100	126	158	178	190		
HDF	RH (%)	0	0.35	0.5	0.7	0.8	0.9	0.95	1.00		
	w (kg/m ³)	0	60	70	95	110	150	185	265		
Savi	RH (%)	0	0.35	0.5	0.65	0.8	0.9				
	w (kg/m ³)	0	5	7.5	8.4	18	34				

Betonin tasapainokosteuden arvot (absorptio) ovat laskettu yhtälöstä: (Hens 2016 s.312)

$$w = 147,5 \times \left(1 - \frac{\ln \phi}{0,0453}\right)^{-\frac{1}{1,67}}, \quad (42)$$

jossa

w betonin kosteuspitoisuus, kg/m³

ϕ on betonin huokosilman suhteellinen kosteus, %.

Tasoitteiden tasapainokosteuden arvot (absorptio) ovat laskettu yhtälöstä: (Hens 2016 s.314)

$$w = 283 \times \left(1 - \frac{\ln \phi}{0,029}\right)^{-\frac{1}{1,39}}, \quad (43)$$

jossa

w tasoitteen kosteuspitoisuus, kg/m³

ϕ on tasoitteen huokosilman suhteellinen kosteus, %.

Männyn tasapainokosteuden arvot (absorptio) ovat laskettu yhtälöstä: (Hens 2016 s.318)

$$w = 100 \times \left(1 - \frac{\ln \phi}{0,642}\right)^{-\frac{1}{0,64}}, \quad (43)$$

jossa

w puun kosteuspitoisuus, kg/m³

ϕ on puun huokosilman suhteellinen kosteus, %.

Yhtälöstä 43 saadut arvot on kerrottu kahdella, jotta mallista saadut arvot saatiin paremmin vastaamaan kenttämittauksista saatuja arvoja. Näin ollen arvot saatiin lisäksi lähemmäksi Vinhan et al. (2013) tutkimuksessa männylle käytettyjä arvoja.

Savelle on käytetty Hens (2016 s. 315) tiilelle annettuja arvoja. Kovalle puukuitulevyllä (HDF) on käytetty Hagentoft (2001 s. 414) annettuja arvoja.

Alla olevassa taulukossa (*Taulukko 20*) on annettu laskennassa käytetyt betonin ja tasoitteiden kapillaarisen kosteusdiffusiviteettien arvot kosteuspitoisuuden funktiona.

Taulukko 20 Laskennassa käytetyt betonin ja tasoitteiden kosteusdiffusiviteettien arvot kosteuspitoisuuden funktiona.

Betoni	w (kg/m ³)	0	29	72	100	116	130	147
	D _w (m ² /s)	1.8e-11	9.7e-11	1.2e-9	6e-9	1.5e-8	3.4e-8	9e-8
Tasoite	w (kg/m ³)	0	29	72	100	116	130	147
	D _w (m ² /s)	1.4e-9	3e-9	9.8e-9	2e-8	3.2e-8	4.6e-8	7.4e-8

Betonin kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin arvot (m²/s) ovat laskettu kaavalla: (Hens 2016 s. 312)

$$D_w = 1,8 \times 10^{-11} \exp(0,058w), \quad (44)$$

jossa

w on betonin kosteuspitoisuus, kg/m³.

Tasoitteiden kapillaarisen kosteusdiffusiviteetin (m²/s) arvot ovat laskettu kaavalla: (Hens 2016 s. 314)

$$D_w = C_1 \exp(C_2 w), \quad (45)$$

jossa

w on tasoitteen kosteuspitoisuus, kg/m³

$$C_1 = 1,4 \times 10^{-9}$$

$$C_2 = 0,027.$$

